

MAURICIO GALO

CALIBRAÇÃO E APLICAÇÃO DE CÂMARAS DIGITAIS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas para a obtenção do título de Mestre em Ciências pela Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA
1993

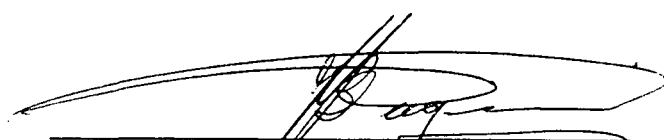
CALIBRAÇÃO E APLICAÇÃO DE CÂMARAS DIGITAIS

por

Maurício Galo
Engenheiro Cartógrafo

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela comissão composta pelos seguintes professores:


Prof. Dr. Quintino Dalmolin Orientador


Prof. Dr. João Bosco Lugnani Co-orientador


Prof(a). Msc. Mary Angélica de Azevedo Olivas

Curitiba, 13 de abril de 1993

AGRADECIMENTOS

Desejo manifestar meus agradecimentos às pessoas e entidades abaixo relacionadas:

Ao professor Dr. João Bosco Lugnani, pela orientação, incentivo, paciência e pelos longos momentos de discussão.

Aos professores Dr. Quintino Dalmolin e Msc. Mary Angélica de Azevedo Olivas, pelo apoio durante a fase experimental.

Aos professores e colegas: Júlio Kiyoshi Hasegawa, Nilton Nobuhiro Imai e Paulo de Oliveira Camargo, pelas discussões, críticas e incentivo.

A professora Maria de Lourdes Bueno Trindade, pela paciência na revisão do texto e incentivo.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésica da UFPR.

A CAPES pelo apoio financeiro durante a realização do curso.

Dedico este Trabalho a:

Meus familiares, mas em especial,
ao SEU PAULO e a DONA JOSEFA.
(in memoriam)

Lú.

SUMÁRIO

<u>FOLHA DE ROSTO</u>	i
<u>TERMO DE APROVAÇÃO</u>	ii
<u>AGRADECIMENTOS</u>	iii
<u>DEDICATÓRIA</u>	iv
<u>SUMÁRIO</u>	v
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	viii
<u>LISTA DE TABELAS</u>	x
<u>RESUMO</u>	xi
<u>ABSTRACT</u>	xii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1	Conceitos Iniciais	1
1.2	Objetivos do Trabalho	4
1.3	Estrutura do Trabalho	5

CAPÍTULO 2 - CÂMARAS DIGITAIS

2.1	Introdução	6
2.2	Imagem Digital: conceito e formação	8

CAPÍTULO 3 - PROBLEMAS NA AQUISIÇÃO DE IMAGENS

3.1	Introdução	12
3.2	Distorção das Lentes	12
3.3	Alinhamento e Espaçamento entre os Sensores	15
3.4	Quantização	18
3.5	Sincronização do Sinal de Vídeo	20
3.6	Frequências de Transmissão da Câmara e do Conversor A/D	25
3.7	Efeito do Aumento da Temperatura	26

CAPÍTULO 4 - CALIBRAÇÃO

4.1	Introdução	29
4.2	Sistemas de Referência	31
4.3	Técnicas de Calibração	36
4.3.1	Auto-calibração Utilizando o Modelo de Coli- nearidade	38
4.3.1.1	Modelo de Colinearidade	39
4.3.1.2	Modelo Matemático Funcional	41
4.3.1.3	Considerações Sobre a Solução	44
4.3.2	Método de Tsai	45
4.3.2.1	Determinação do Fator de Escala	46
4.3.2.2	Determinação do Centro da Imagem	55
4.3.2.3	Calibração	58
4.3.3	Transformação Linear Direta	64

CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTOS E RESULTADOS

5.1	Introdução	68
5.2	Materiais	68
5.3	Experimento I - Determinação do Fator de Escala	71
5.3.1	Programas Desenvolvidos	71
5.3.2	Coleta de Dados e Processamento	73
5.3.3	Apresentação e Análise dos Resultados	74
5.4	Experimento II - Utilização da Transformação Projetiva no Plano	82
5.4.1	Programas Desenvolvidos	82
5.4.2	Coleta de Dados e Processamento	83
5.4.3	Apresentação e Análise dos Resultados	86
5.5	Experimento III - Utilização da Transformação Linear Direta	93
5.5.1	Programa Desenvolvido	94
5.5.2	Processamento e Análise dos Resultados	95
5.6	Experimento IV - Auto-calibração	98
5.6.1	Programa Desenvolvido	98
5.6.2	Coleta de Dados e Processamento	103

5.6.3	Apresentação e Análise dos Resultados	105
5.7	Proposta de Aplicação	109
5.7.1	Princípio do Sistema Aplicado ao Controle de Qualidade	110

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1	Considerações Finais	123
6.2	Conclusões	125
6.3	Recomendações	127
<u>ANEXOS</u>		129
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>		147

LISTA DE FIGURAS

Figura

2.1	Estrutura da superfície sensora	9
2.2	Princípio da obtenção da Imagem Digital	10
2.3	Estrutura básica da câmara e do sistema de transferência	11
3.1	Influência do alinhamento e espaçamento dos sensores na imagem	16
3.2	Campos pares e ímpares, o <i>frame</i> e o modo de entrelaçamento	21
3.3	Pulso de sincronização horizontal	24
3.4	Efeito da não sincronização horizontal	25
3.5	Comportamento das coordenadas x e y em função do tempo	27
4.1	Sistema da câmara, sistema fotogramétrico, sistema do <i>frame buffer</i> e sistema com origem no centro do <i>frame</i>	34
4.2	Condição de colinearidade	41
4.3	Faixas geradas pela interferência entre o <i>clock</i> do conversor A/D e da câmara	49
4.4	Função de ponderação para N=512 e j=1	55
5.1	Linha média da imagem IM01 e o espectro correspondente	75
5.2	Tons de cinza da linha média da imagem IM01	76
5.3	Faixas geradas pela interferência entre o <i>clock</i> do conversor A/D e da câmara HR 600 da UFPR	77
5.4	Detalhe do espectro das linhas médias para a imagem IM01 e IM02	78
5.5	Detalhe do espectro das linhas médias para a imagem IM01 e IM02 utilizando 256 pixels	79
5.6	Posicionamento do alvo e da câmara durante a tomada das imagens	85

5.7	Discrepâncias nos pontos do espaço objeto	107
5.8	Concepção de uma superfície para o apoio das peças	112
5.9	Fluxograma mostrando o procedimento de controle de qualidade de peças, utilizando a auto-calibração ..	113
5.10	Superfície de suporte com uma peça	117
5.11	Princípio da detecção das bordas	119
5.12	Fluxograma mostrando o procedimento de controle de qualidade de peças, utilizando uma transformação T	122

LISTA DE TABELAS

Tabela

5.1	Quadro comparativo dos fatores de escala determinados através de diferentes testes	81
5.2	Discrepâncias Médias em x e y e desvios padrão das discrepâncias	87
5.3	Tabela mostrando as estatísticas amostrais t para as discrepâncias médias em x e y	89
5.4	Valores da estatística F para os testes realizados	91
5.5	Discrepâncias máximas ocorridas em x e y	92
5.6	Discrepâncias médias em x e y; desvios padrão das discrepâncias e estatística t para os testes realizados com a DLT	95
5.7	Discrepâncias máximas verificadas em x e y, quando da utilização da DLT	96
5.8	Discrepâncias médias em x e y, desvios padrão das discrepância e discrepâncias máximas, para o resultado da auto-calibração	106

RESUMO

Com o desenvolvimento tecnológico que caracteriza algumas áreas do conhecimento, como por exemplo a visão de máquina e a fotogrametria digital, a utilização de imagens adquiridas por câmaras digitais vem crescendo consideravelmente em função do seu potencial de aplicação. Em consequência disto, grandes esforços são feitos no sentido de melhorar a qualidade das informações métricas, o que só é possível quando as fontes de erros, inerentes ao processo de aquisição da imagem por uma câmara digital, são conhecidas. É neste contexto que são abordados, neste trabalho, os problemas que ocorrem durante o processo de aquisição destas imagens, bem como algumas técnicas de calibração de câmaras digitais, além de procedimentos de parametrização. Foram implementados programas que possibilitaram calibrar a câmara digital HR-600 da Universidade Federal do Paraná, e das técnicas utilizadas, aquela que forneceu os melhores resultados foi a auto-calibração por feixes de raios, onde foram parametrizados os elementos f , x_0 , y_0 , K_1 , A e B . Finalmente, para ilustrar um possível campo de aplicação de tais câmaras, apresenta-se uma concepção para o desenvolvimento de um Sistema de Controle de Qualidade, por fotogrametria digital.

ABSTRACT

Due to the wide range of applications of the digital camera, its use has been increasing considerably with the development of new technologies, as in the areas of machine vision and digital photogrammetry. As a result, it is necessary to improve the accuracy of the geometric measurements taken by the digital cameras. This is possible only if the source of errors that impairs the quality of the image acquired by digital cameras is known. This work approaches some problems that occur during the acquisition process of the images as well in some calibration techniques. Some computational programs were developed and implanted and they have made it possible to calibrate the HR-600 digital camera, at the UFPR. Better results were obtained with the self-calibration by bundle adjustment with additional parameters f , x_0 , y_0 , K_1 , A and B . At last, this study shows the principles for the development of a quality-control system using digital photogrammetry, so as to illustrate potential applications.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Conceitos Iniciais

A utilização de câmaras digitais em diferentes aplicações cresce dia a dia graças ao desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas, como por exemplo: visão robótica, visão de máquina, fotogrametria em tempo real (RTP - *Real Time Photogrammetry*), tratamento digital de imagens, engenharia dos materiais e eletrônica.

Um dos elementos chave de um sistema de fotogrametria em tempo real é segundo Gruen (1987), a aquisição de imagens, pois do sucesso desta fase dependerá todas as outras. Esta afirmação pode ser extendida para o tratamento digital de imagens pois, de acordo com Bahr (1988), o fluxo de operações neste processo compreende três níveis: aquisição, processamento e o nível de representação dos dados. Também em visão robótica, a aquisição de imagens é elemento fundamental. A partir disso, pode-se considerar a câmara digital como um importante elemento na concepção dos sistemas citados anteriormente.

Uma das vantagens da utilização de câmaras digitais é a possibilidade de processamento dos dados quase que simultaneamente com sua aquisição e armazenamento, daí a utilização da expressão "Fotogrametria em Tempo Real". Em termos de aquisição e processamento de imagens, pode-se considerar que um processo ocorre em Tempo Real, quando o tempo de resposta for menor que o tempo de formação de um quadro (*Frame Time* ou vídeo ciclo). Este tempo de resposta dependerá do padrão do sinal de vídeo utilizado, sendo em geral, da ordem de 1/30 a 1/25 segundos. Logicamente, para que as tarefas correntemente executadas em fotogrametria sejam realizadas em *real time*, são necessários equipamentos com alta velocidade de processamento.

Assim, pode-se identificar inúmeras aplicações para as imagens obtidas com câmaras digitais. Faust (1988) sugere várias aplicações para a utilização de sensores lineares, as quais são também válidas para os sensores do tipo matricial, entre elas:

- correlação digital de pontos para a produção de modelos digitais de elevação (DTM);
- conversão de produtos analógicos em imagens digitais;
- detecção e correlação de pontos sinalizados ou feições naturais para a determinação de coordenadas tridimensionais via triangulação por feixes de raios;
- integração de fotografias digitalizadas (ou adquiridas diretamente) em bancos de dados com

estrutura *raster*;

- processamento digital de imagens (compreendendo por exemplo: manipulação de histogramas, filtragem, "junção" (*mosaicking*) de diversas cenas);
- classificação digital de feições naturais.

Tendo em vista diferentes aplicações possíveis de serem executadas, um eventual usuário pode estar interessado apenas na obtenção de informações de natureza geométrica (distâncias, ângulos, coordenadas), ou então, em informações puramente radiométricas (côr, tom de cinza), ou ainda na fusão de ambas. Porém, qualquer que seja a aplicação, é necessário que se conheça o nível de resposta da câmara, com respeito à realidade física (estado da câmara).

Para que se conheça este "estado da câmara", é necessário que sejam feitas avaliações, tanto geométricas quanto radiométricas, da mesma. Na análise radiométrica deve ser verificado, por exemplo, se o nível de ruídos e a estabilidade térmica não prejudicam a resposta espectral da câmara; enquanto que, na análise geométrica deve-se procurar a determinação de parâmetros para fazer a correção de erros sistemáticos, permitindo assim que sejam obtidas posições com a acurácia necessária para determinadas aplicações. O procedimento de determinação destes parâmetros é conhecido como calibração.

Para que se possa realizar o procedimento de

calibração, primeiramente é necessário que se conheça cada uma das fontes de erro atuantes no processo de aquisição da imagem. A partir disso, devem ser propostos modelos matemáticos que representem a realidade física. Finalmente, os modelos propostos devem ser testados.

Vários são os modelos matemáticos que vem sendo aplicados na calibração de câmaras digitais. Entre eles pode-se destacar: a Auto-Calibração utilizando as equações de colinearidade com parâmetros adicionais (El-Hakim, 1986; Beyer, 1987; Gruen & Beyer, 1987) e o Método de Tsai em dois estágios (Lenz & Tsai, 1986; Lenz & Tsai, 1988). Além destes, modelos para a parametrização, como a Transformação Linear Direta, proposta por Abdel-Aziz e Karara (Atkinson, 1980) no início da década de 70 para câmaras não métricas, são também utilizados.

1.2 Objetivos do Trabalho

Os objetivos deste trabalho referem-se basicamente à realização de uma revisão dos seguintes tópicos: câmaras digitais e formação de imagens digitais; problemas na aquisição de imagens digitais, a partir de câmaras CCD e procedimentos de parametrização e calibração de tais dispositivos. Com base nesta revisão, pretende-se realizar a calibração da câmara HR-600 da Universidade Federal do Paraná. Além disso, pretende-se propor os princípios para um sistema de controle de qualidades em atividades industriais, por meios

fotogramétricos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado de tal forma que no capítulo 2 são apresentados os princípios básicos da obtenção de imagens a partir de sensores do tipo CCD. No capítulo seguinte são mostrados alguns problemas que ocorrem durante o processo de aquisição das imagens e no capítulo 4 é feito o estudo de alguns métodos de calibração e procedimentos de parametrização. Os experimentos realizados, bem como alguns resultados obtidos com a câmara HR-600, além da proposta de um sistema para controle de qualidade, são apresentados no capítulo 5. Finalmente no capítulo 6 são feitas algumas considerações, conclusões e recomendações baseadas nos estudos realizados.

CAPÍTULO 2

CÂMARAS DIGITAIS

2.1 Introdução

As câmaras digitais são dispositivos nos quais a superfície sensora é constituída de elementos fotodetectores ao invés de uma película fotográfica sensível, como é o caso das câmaras convencionais. O seu desenvolvimento deu-se a partir do estudo de elementos semicondutores a base de silicone, os chamados *chips*, que segundo Gruen (1987), são usados desde 1960. Daí percebe-se a importância da eletrônica e engenharia de materiais nesta área, ou seja, no desenvolvimento de elementos condutores e semicondutores.

Em função da disposição dos fotodetectores pode-se dividir os sensores em três grupos: os de varredura ótico-mecânico (*opto-mechanical scanner*), os sensores de arranjo linear (*linear array*) e os sensores de arranjo matricial (*area array*). O primeiro grupo pode ser composto de um ou mais elementos sensores, onde a captura do sinal é feita por varreduras através de espelhos rotativos e/ou oscilantes. O sensor de arranjo linear é, como o próprio nome diz, um

sensor onde os elementos sensitivos estão dispostos na forma linear e a varredura se faz através do movimento de toda a câmara, ou da linha de sensores dentro da câmara. Estes dois tipos são mais comuns na coleta de imagens de satélites a partir de plataformas orbitais. No terceiro grupo, os elementos sensores estão dispostos numa matriz bidimensional. Este tipo de sensor é mais usual em aplicações a curta distância onde pode se utilizar com facilidade o modelo das equações de colinearidade, muito comum em fotogrametria analítica.

Com base no tipo de Leitura/Saída (*readout*) de carga, pode ser feita uma outra classificação dos sistemas sensores, ou seja, eles podem ser divididos em (Gruen, 1987):

- CCD (*charge coupled device*);
- CID (*charge injection device*);
- fotodiodo.

As câmaras mais utilizadas são as do tipo CCD que são geralmente do tipo matricial e possuem um dispositivo de transferência de carga. Câmaras que apresentam tal dispositivo pertencem a um grupo mais amplo chamado de CTD (*charge transfer device*). Uma discussão mais aprofundada do sistema *readout* envolve conceitos de física e eletrônica, os quais fogem ao escopo e objetivos deste trabalho.

Na literatura consultada observa-se que existem diversas

maneiras de se referir às câmaras digitais, entre as quais podem ser citadas: câmara CCD (*CCD - camera*), câmaras matriciais (*array camera*), câmaras matriciais de elementos discretos (*discrete array camera*), vídeo câmaras CCD (*CCD - video camera*), câmara do estado sólido (*solid state camera*), etc. No âmbito do presente trabalho utilizar-se-á a expressão "Câmara CCD", ou simplesmente "Câmaras digitais" para referir às câmaras matriciais.

2.2 Imagem Digital: conceito e formação

A imagem digital nada mais é do que um conjunto de elementos de imagem espacialmente ordenados em uma matriz bidimensional, cuja posição pode ser dada por (x,y) , sendo que a cada elemento de imagem (pixel) é associado um tom de cinza, expresso genericamente por $g(x,y)$. Se cada um desses elementos da imagem for armazenado em "palavras" de n bits, o número máximo de tons de cinza que pode ocorrer na imagem será 2^n .

Em geral estas "palavras" que definem os tons de cinza são de 8 bits, sendo portanto, a imagem composta de 256 tons, variando entre 0 a 255. O número de bits por palavra está relacionado diretamente com a resolução em tom de cinza (*grey value resolution*) ou resolução radiométrica, e com a capacidade de memória do computador. A resolução em tom de cinza está relacionada com o número de tons de cinza que uma imagem pode apresentar, e conseqüentemente, quanto maior este

número, maior será o detalhamento da imagem. Por outro lado, quanto maior a resolução em tons de cinza, maior deve ser a capacidade de memória para guardar as informações. Por exemplo, uma imagem composta por 512 x 480 pixels (com 8 bits/pixel) ocupará um espaço de memória de aproximadamente 246 kbytes.

A figura 2.1, mostra de modo simplificado, a estrutura da superfície sensora.

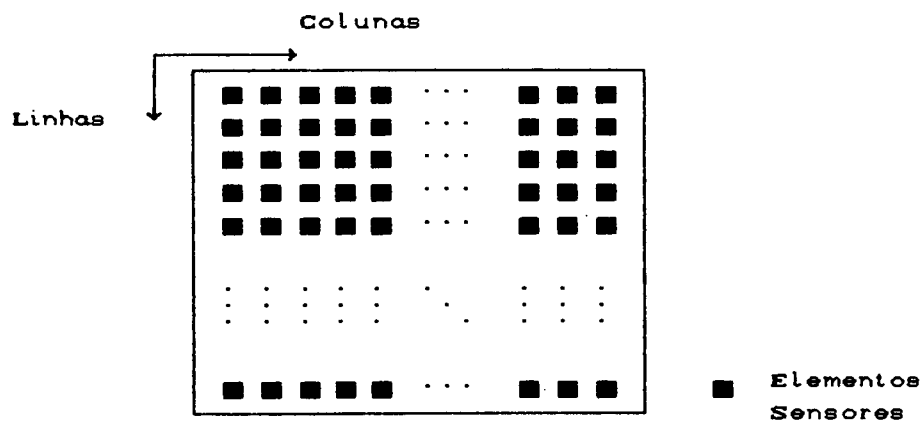


Fig. 2.1 - Estrutura da superfície sensora.

Pode-se ter a idéia do princípio da obtenção da imagem digital a partir do esquema ilustrado na figura 2.2.

A análise da figura 2.2 permite verificar que o feixe luminoso ao incidir nos elementos sensores, depois de passar pelo sistema de lentes, provoca a geração de um sinal elétrico

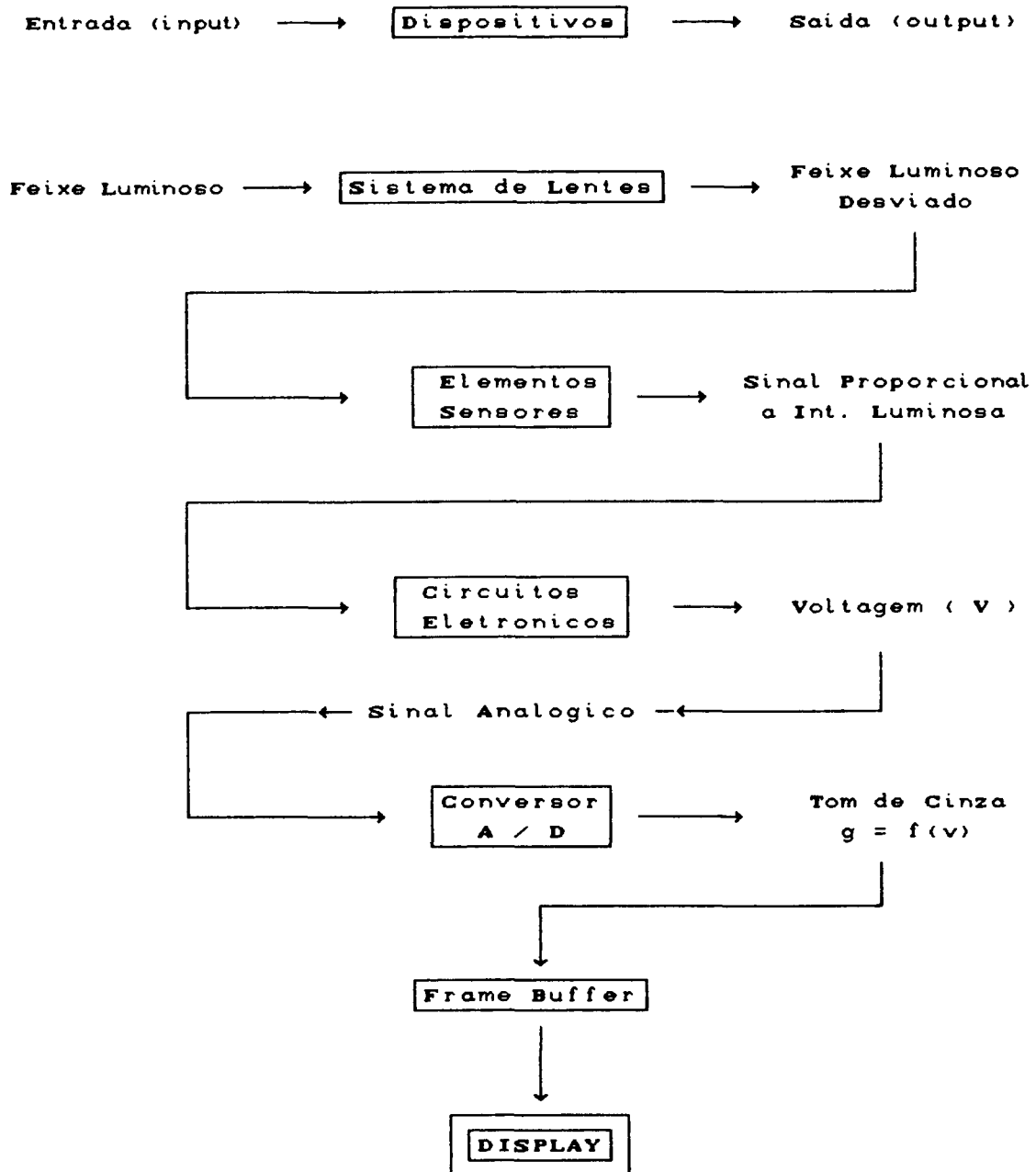


Fig. 2.2 - Princípio da obtenção da Imagem Digital.

proporcional a intensidade de luz incidente. Estes sinais são armazenados em capacitores e passam por um processo de amplificação, onde é produzida uma série de voltagens. Estas

quantidades são então convertidas em grandezas discretas por meio de um conversor analógico/digital (conversor A/D).⁽¹⁾ Em seguida estes sinais são armazenados no *frame buffer*⁽²⁾ e posteriormente mostrados num *display*.

Para complementar a idéia de formação da imagem, a figura 2.3 ilustra uma representação da estrutura básica da câmara com o sistema de transferência dos sinais.

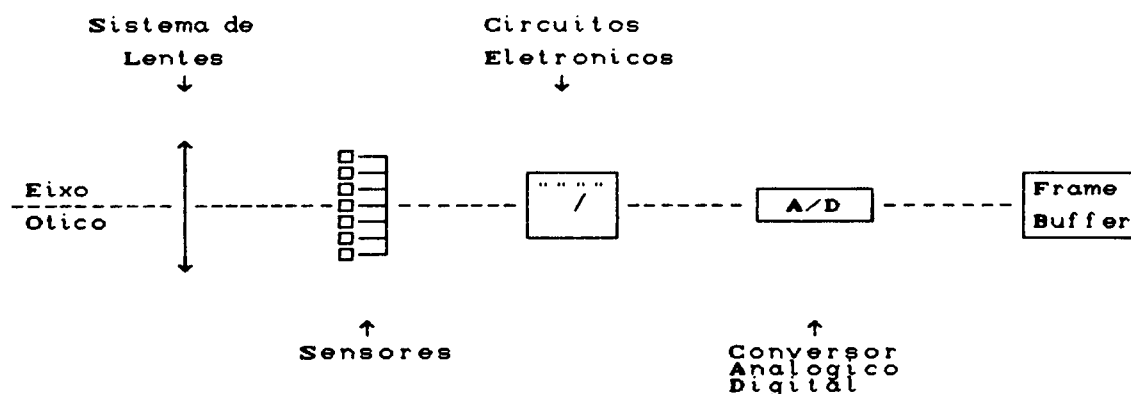


Fig. 2.3 - Estrutura básica da câmara e do sistema de transferência.

-
- (1) Conversão Analógico-Digital - Nome dado ao processo de amostragem de sinais analógicos contínuos em uma série de grandezas digitais.
- (2) *Frame Buffer* - Memória de alta velocidade reservada para armazenar uma ou mais cenas, permitindo a sua rápida visualização no *display*. Também conhecido como *Frame Store* (ITEX PCplus Programmer's Manual, 1987).

CAPITULO 3

PROBLEMAS NA AQUISIÇÃO DA IMAGEM

3.1 Introdução

O processo de formação da imagem inicia-se no momento em que a radiação eletromagnética, emitida pelos objetos, atravessa o sistema ótico da câmara. A partir deste instante, o sinal é recebido pela matriz de sensores, passando posteriormente, por um processo de discretização, conforme mostrado na figura 2.2.

Em cada uma das fases descritas no capítulo anterior são introduzidos erros, com causas e características diferentes. A partir de agora alguns dos fatores que afetam a qualidade da imagem serão discutidos.

3.2 Distorção das Lentes

Pode-se considerar as distorções do sistema de lentes como sendo perturbações sofridas pelos raios de luz, ao atravessar um sistema ótico. Estas perturbações podem tanto prejudicar a qualidade, quanto provocar deslocamentos na

imagem. As distorções são decorrentes, basicamente, do processo de fabricação e do fato das lentes terem superfícies esféricas, ao invés de um parabolóide de revolução. Segundo Seidel, as aberrações (monocromáticas) causadas por estes motivos são: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção. As quatro primeiras prejudicam a qualidade da imagem, enquanto que a última, provoca deslocamentos na imagem e caracteriza-se por ser radial e simétrica. Além desta distorção, existe aquela provocada pelo não perfeito alinhamento dos eixos das lentes de um sistema ótico, denominada distorção descentrada.

A distorção radial provoca deslocamentos na direção radial, a partir do ponto principal, podendo ser considerada como uma parcela da refração sofrida por um raio de luz, ao passar pelo sistema ótico. Esta distorção pode ser modelada por diferentes polinômios. As fórmulas apresentadas são largamente utilizadas e são derivadas do polinômio utilizado por Conrady. Considerando apenas os três primeiros termos do polinômio, as componentes em x e y, da distorção radial simétrica são respectivamente (Merchant, 1979; Moniwa, 1972):

$$\begin{aligned}\delta x_r &= (x_f' - x_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\ \delta y_r &= (y_f' - y_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)\end{aligned}\tag{3.1}$$

onde:

• x_f', y_f' - coordenadas de imagem com origem no centro

da imagem;

- . x_o, y_o - coordenadas do ponto principal em relação ao centro da imagem;
- . K_1, K_2, K_3 - coeficientes da distorção radial simétrica;
- . $r = ((x_f' - x_o)^2 + (y_f' - y_o)^2)^{1/2}$.

A distorção descentrada foi primeiramente estudada por Pennington em 1947, posteriormente por Washer, Conrady e Brown, sendo que o modelo Conrady-Brown modificado é o mais aceito:

$$\begin{aligned}\delta x_d &= [P_1(r^2 + 2(x_f' - x_o)^2) + 2P_2(x_f' - x_o)(y_f' - y_o)](1 + P_3r^2 \dots) \\ \delta y_d &= [P_2(r^2 + 2(y_f' - y_o)^2) + 2P_1(x_f' - x_o)(y_f' - y_o)](1 + P_3r^2 \dots)\end{aligned}\quad (3.2)$$

onde:

- . P_1, P_2, P_3 - coeficientes da distorção descentrada.

Na aplicação das equações (3.2) para a correção da distorção descentrada em câmaras métricas convencionais, os termos P_3 e os seguintes são desprezados, devido a sua pequena influência. Deste modo as equações (3.2) se reduzem a:

$$\begin{aligned}\delta x_d &= P_1(r^2 + 2(x_f' - x_o)^2) + 2P_2(x_f' - x_o)(y_f' - y_o) \\ \delta y_d &= P_2(r^2 + 2(y_f' - y_o)^2) + 2P_1(x_f' - x_o)(y_f' - y_o)\end{aligned}\quad (3.3)$$

Os parâmetros P_1 e P_2 são de pequena magnitude,

significando que em função da precisão requerida, esses parâmetros podem ser desprezados. Muitos autores não consideram estes parâmetros, bem como os parâmetros K_2 e K_3 na calibração de câmaras digitais devido a sua pequena influência na modelagem da distorção das lentes.

3.3 Alinhamento e Espaçamento entre os Sensores

Depois de passar pelo sistema de lentes, o feixe luminoso incide em uma matriz de sensores que materializa o plano focal. Esta matriz de sensores é composta por uma série de pixels dispostos em colunas e linhas e a manutenção do espaçamento entre estes pixels, bem como do alinhamento entre as linhas e colunas, é importante para garantir a qualidade da imagem.

Quando se fala na manutenção do espaçamento entre os pixels está se referindo à sua preservação nas direções das linhas e das colunas, o que não significa, necessariamente, que este espaçamento deva ser o mesmo nestas duas direções. A figura 3.1 ilustra como o efeito do alinhamento e como o espaçamento dos sensores, pode afetar a imagem.

Na figura 3.1(a) tem-se a projeção de um objeto sobre o plano dos sensores e em (a') verifica-se a discretização do que os sensores recebem em (a). Em (b) observa-se a projeção do objeto imageado em (a), porém com uma diferença na linha de número 9(nove), que não mantém o alinhamento com as demais,

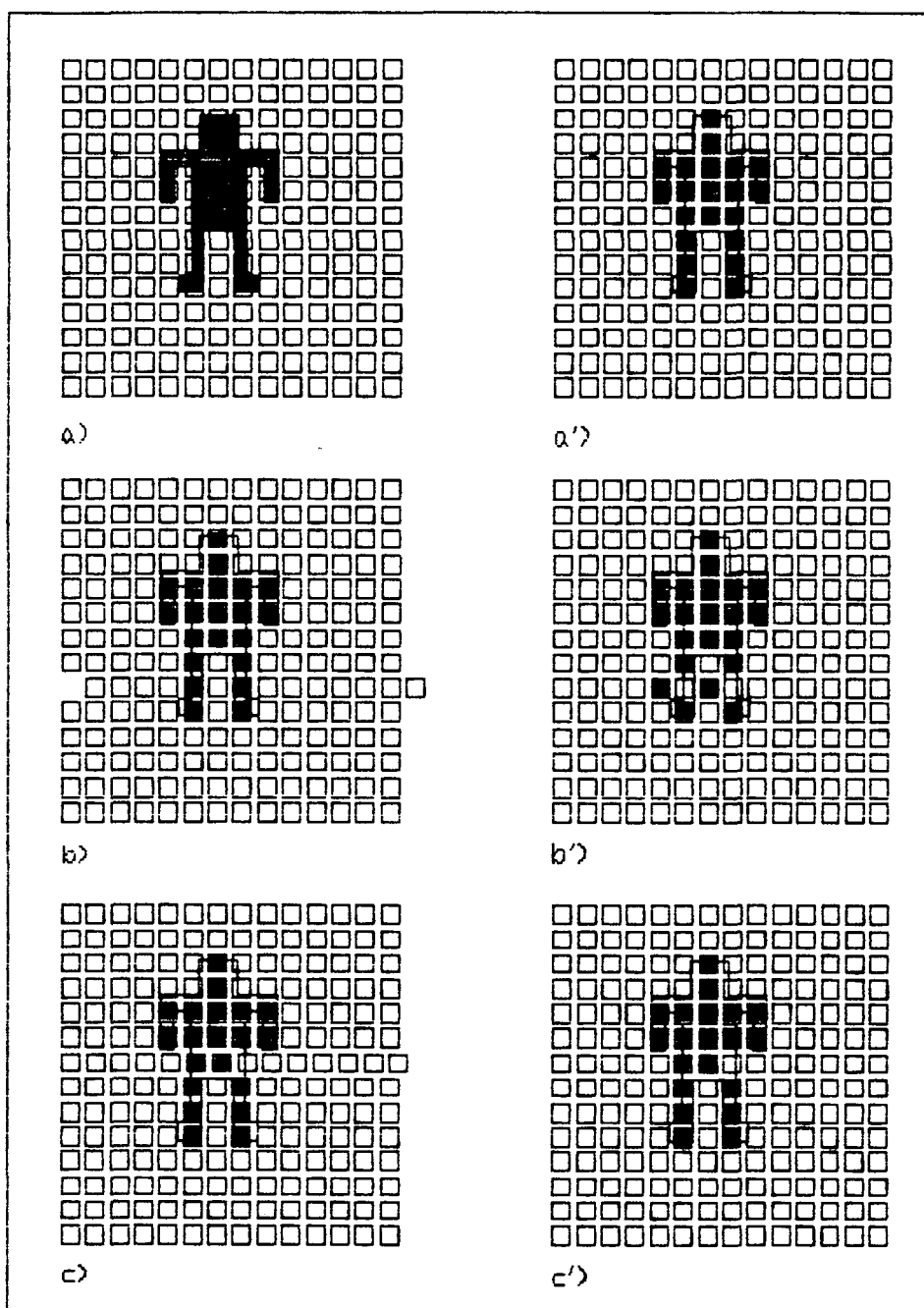


Fig. 3.1 - Influência do alinhamento e espaçamento dos sensores na imagem. Em a) pode ser vista a projeção de um objeto no plano dos sensores, e em a') a discretização do que os sensores recebem em a); em b) observa-se uma matriz de sensores não perfeitamente alinhada, e em b') tem-se a imagem gerada a partir de b). Finalmente em c) é apresentada uma matriz onde o espaçamento ao longo de uma linha é diferente das demais, em c') tem-se a imagem correspondente.

resultando em uma imagem como a observada em (b'), com um deslocamento aparente na direção horizontal. Em (c) a matriz de sensores mostra a linha de número 7(sete) com um espaçamento diferente das demais, e como resultado tem-se a imagem (c').

A princípio este tipo de erro pode ser detectado, se por exemplo, forem feitas imagens de feições lineares. Desprezando-se todos os demais erros que podem ocorrer na aquisição da imagem, pode-se considerar que, se uma feição reta for imageada, sua imagem deve, obrigatoriamente, ser uma feição reta, e qualquer desvio nessa "linearidade" será causado pelo não alinhamento dos sensores e não uniformidade no seu espaçamento.

Em princípio, isto parece simples de ser detectado, mas na realidade os erros em uma imagem são decorrência de uma série de erros e a sua separação não é tão trivial. De fato, a não linearidade de feições retas numa imagem, pode ser causada pela composição dos seguintes efeitos: não alinhamento e espaçamento irregular dos sensores; problemas na sincronização do sinal de vídeo, causando *line jitter* e também as distorções das lentes.

Brown utilizou a idéia de que se a imagem de uma feição reta não for representada por uma reta, esta não linearidade pode ser utilizada para a determinação das distorções óticas, admitindo que apenas esta seja a causa deste desvio. Este

método, desenvolvido por Brown e conhecido como *plumb line method* é utilizado para o caso de fotografias convencionais e pode ser estendido para o caso de imagens digitais, neste caso admitindo como causa da não linearidade, além da distorção das lentes os fatores mencionados no parágrafo anterior.

Beyer (1987) aplicou o método desenvolvido por Brown, *plumb-line method*, para câmaras digitais, levando em conta os efeitos das distorções das lente e *line jitter*, simultaneamente.

Este tipo de erro, como pode-se perceber, dependente do processo de fabricação e montagem da matriz de sensores na câmara CCD e são erros de pequena magnitude.

3.4 Quantização

Na tomada de uma imagem por uma câmara digital, as informações do espaço objeto que estão em seu campo visual são projetadas em uma pequena região, denominada plano focal, região esta não contínua.

Neste processo de aquisição da imagem pode-se verificar uma etapa de quantização (discretização) espacial e uma quantização em termos de tons de cinza (radiométrica). A quantização é decorrente da transformação de uma função contínua para uma função discreta. É importante frisar que em todo processo de quantização, por menor que seja o período de

amostragem, alguma informação é perdida. No caso da discretização em tons de cinza, o mais comum é guardar as informações em computadores de 8 bits, o que permite o armazenamento de dados espectrais do espaço objeto em 256 níveis. Dependendo da aplicação para qual a imagem for tomada, esta resolução em tons de cinza pode ser mais do que suficiente. Por exemplo, em alguns sistemas de visão destinados ao controle de operações industriais, a quantização pode ser feita em 64 níveis ou até menos, o que torna o sistema mais rápido. Além de saber a resolução em tons de cinza é importante conhecer qual é o erro cometido neste processo.

Kamgar-Parsi *et alli* (1989) propuseram meios para a avaliação do erro de quantização em visão. Segundo estes autores o erro máximo que pode ser cometido para uma certa quantidade A a ser discretizada, é a metade da unidade de quantização γ . Isto significa que o erro máximo de quantização espacial é meio *pixel*. No caso da quantização em tom de cinza o erro máximo é de meio tom de cinza.

A minimização destes erros depende menos do processamento e mais do *hardware*. Para minimizar o erro de quantização deve-se utilizar câmaras com maior resolução, ou seja, câmaras com um maior número de elementos sensores, com dimensões menores.

3.5 Sincronização do Sinal de vídeo

As câmaras do tipo CCD mais comuns, utilizam sinais de vídeo padrão. A grande vantagem da utilização destes sinais é que a maioria dos equipamentos que recebem sinais de vídeo, também os utilizam.

Diversos são os padrões de sinais de vídeo (*standart video signal*) disponíveis. Para o caso de transmissões coloridas, correntemente em uso, Gruen (1987) relaciona:

- NTSC (*National Television System Committee*), é um padrão utilizado na América do Norte, América do Sul e Japão;
- PAL (*Phase Alternating Line*), é um padrão utilizado na Europa;
- SECAM (*Sequential Couleur a Memoire*), é um padrão utilizado na França e
- RGB (*Separate Red/Green/Blue input/output*).

No caso de transmissões monocromáticas tem-se:

- RS-170 (é derivado do NTSC) com uso comum na América do Norte, América do Sul e Japão;
- CCIR (*Consultive Committe, International Radio*), é utilizado na Europa e
- RS-330 , é um padrão usual para sistemas de varredura na forma *raster*.

Cada um destes padrões tem características específicas, sendo diferenciados principalmente pelo número de quadros por segundo e pelo número de linhas por campo. Além destas características, pode-se ter sinais entrelaçados (*interlaced*) e não entrelaçados (*non-interlaced*). Os padrões NTSC, RS-170 e CCIR, são do modo entrelaçado, enquanto que o padrão RS-330, por exemplo, é do tipo não entrelaçado. Nos padrões de modo entrelaçado a imagem é composta por dois campos, o campo das linhas pares e das linhas ímpares, que são transmitidos consecutivamente. A figura 3.2 mostra esquematicamente os campos pares e ímpares, o *frame* e o modo de entrelaçamento.

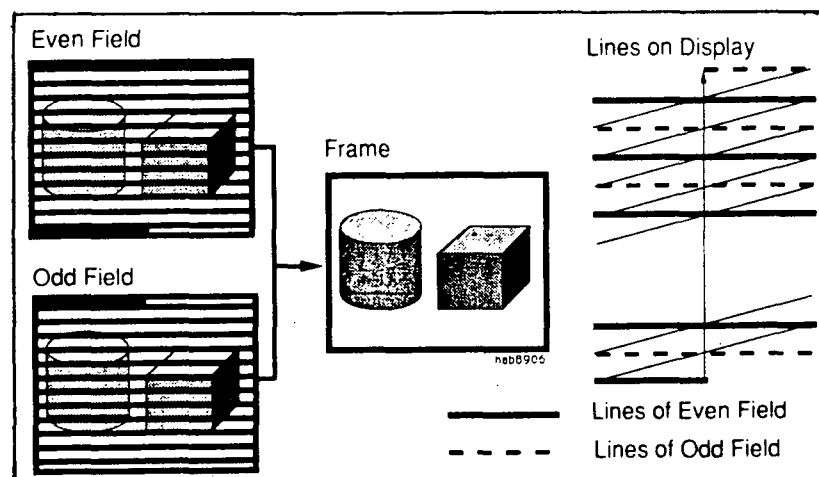


Fig. 3.2 - Campos pares e ímpares, o *frame* e o modo de entrelaçamento. Adaptado de Beyer (1990).

Para maiores detalhes sobre o assunto consulte Beyer (1990) e Gruen (1987).

A informação transmitida pela câmara é conduzida por meio de um sinal unidimensional onde o tempo é a variável independente. As transmissões são feitas por linha, ou seja,

diretamente sobre a escala de tempo, enquanto que as informações das linhas seguintes são dadas por varreduras consecutivas, e a sua variação é feita por incrementos unitários. Logicamente o padrão do sinal transmitido pela câmara deve ser decodificado pelo conversor A/D, portanto, tanto a câmara quanto o conversor A/D devem ser compatíveis neste sentido. Para uma completa transmissão de informações o sinal deve conter:

- sinal analógico (contém as informações pictoriais);
- referências do sinal analógico (nível zero e o *range*); são referências que indicam o nível de cinza zero e a diferença entre o nível máximo e o nível zero;
- intervalo de amostragem (*pixelclock*);
- início de uma nova linha (sincronização horizontal);
- início de um novo campo / quadro (sincronização vertical); e
- indicação do primeiro e segundo campo, no caso de utilização de um padrão entrelaçado.

Outras informações de natureza eletrônica são necessárias para a perfeita decodificação do sinal, para detalhes neste sentido sugere-se consultar Beyer (1990).

A importância da sincronização, tanto vertical quanto horizontal, está no fato de que são elas quem indicam o começo de um novo quadro, um novo campo ou uma nova linha. A

sincronização vertical indica o começo de um novo quadro, ou um novo campo. A horizontal indica o início de uma nova linha. A sincronização horizontal é dada normalmente por um pulso, chamado de pulso de sincronização, ou ainda, pulso de sincronização de linha (*line synchronization pulse*). Este pulso é emitido um pouco antes do início da transmissão das informações de uma linha e tem uma certa duração (Δt). O valor exato de Δt não é tão crítico, pois imagens tomadas com diferentes valores de Δt difeririam apenas por uma translação na direção das linhas, enquanto que a alteração do Δt , em algumas linhas de uma mesma imagem, provocaria erros nas coordenadas x dos pontos pertencentes a essas linhas. No caso do padrão CCIR, a amplitude do pulso de sincronização é negativa em relação ao menor valor possível de tom de cinza ($g=0$), que corresponde à cor preta. A figura 3.3 ilustra o pulso de sincronização horizontal.

As informações radiométricas das imagens são codificadas em voltagens, sendo que alterações provenientes da fonte de alimentação provocam mudanças no sinal, e consequentemente perturbações na imagem, como por exemplo deslocamentos horizontais. Este efeito é mostrado por Dähler (1987).

Possíveis erros e/ou mudanças no nível de detecção bem como diferenças de fase dos pulsos de sincronização da câmara e do conversor A/D provocam um deslocamento na direção horizontal, denominado *line jitter*.

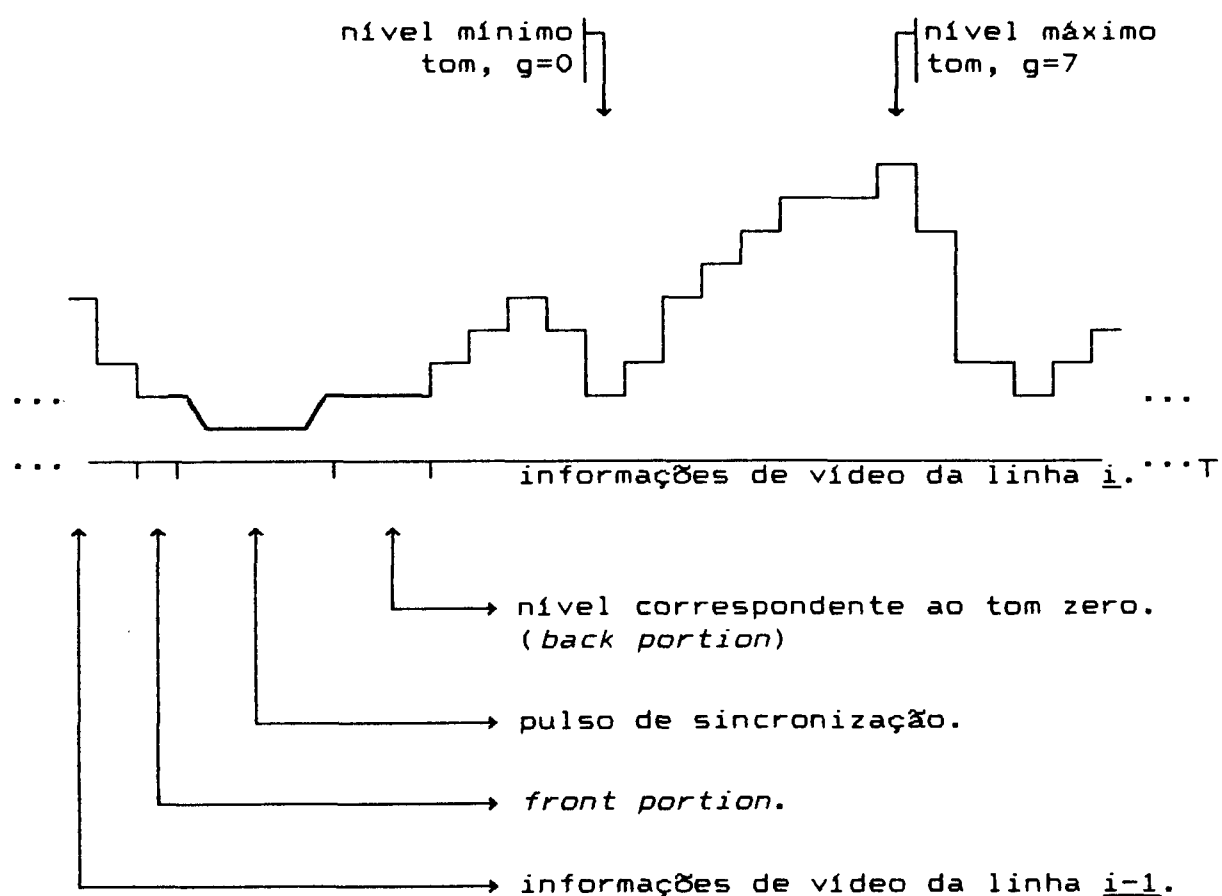


Fig. 3.3 – Pulso de Sincronização horizontal.
(Considerando uma imagem de 3 bits)

Com a finalidade de ilustrar o efeito da sincronização horizontal sobre o sinal é apresentada a figura 3.4.

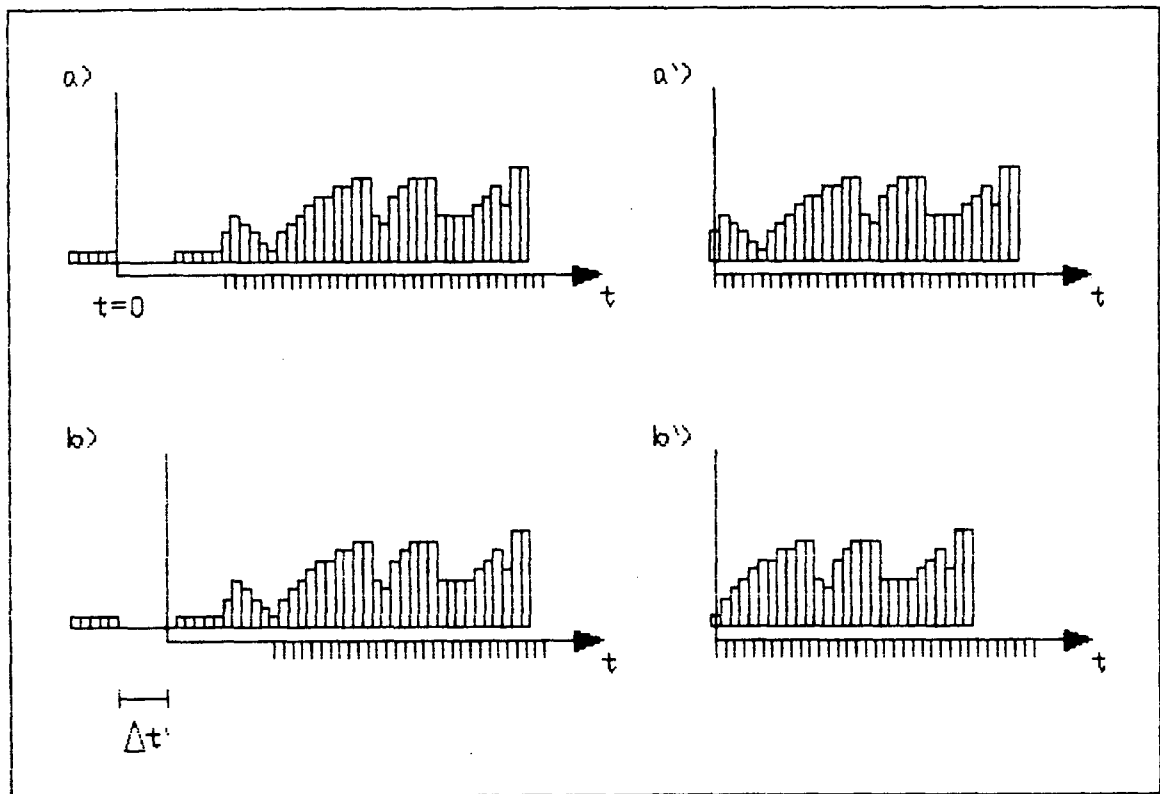


Fig. 3.4 - Efeito da não sincronização horizontal. Em a se observa um sinal corretamente sincronizado, e em a' o sinal após a discretização. Em b o pulso de sincronização é detectado depois de um certo $\Delta t'$, provocando um *shift* na linha, conforme é mostrado em b'.

3.6 Frequências de Transmissão da Câmara e do Conversor A/D

Como visto anteriormente, as câmaras CCD são instrumentos onde os elementos sensores estão dispostos em uma matriz bidimensional, onde cada um desses elementos recebe sinais luminosos e uma resposta (sinal) é produzida. A frequência de transmissão dos dados pela câmara (f_c) não precisa ser, necessariamente, igual à frequência de transmissão do conversor A/D ($f_{A/D}$), e geralmente não o é.

Esta diferença de frequências provoca uma alteração no fluxo dos dados. Em outras palavras, a taxa de reamostragem do conversor A/D não é a mesma daquela do sinal que sai da câmara, o que acarreta uma não correspondência entre elementos sensores e elementos da imagem (pixel), de uma mesma linha. Esta alteração provoca o aparecimento de um fator de escala no sentido horizontal (S_x).

De acordo com Lenz (1986) pode-se dizer que existem dois fatores de escala diferentes, um na direção x (horizontal) e outro na direção y (vertical). Devido ao padrão de varredura do sinal de TV, há uma correspondência entre as linhas do *frame buffer* e as da matriz de sensores. Deste modo a relação entre o espaçamento vertical dos elementos sensores e dos pixels é 1(um). O mesmo não se pode dizer do espaçamento horizontal, o que torna necessário que o fator de escala horizontal seja mais um elemento a ser considerado no procedimento de calibração. Maiores detalhes sobre a determinação do fator de escala serão dados no capítulo 4.

3.7 Efeito do Aumento da Temperatura

Um dos fatores, também importante, a ser observado é o efeito do aumento da temperatura (*Warm-up effects*) durante o processo de aquisição de dados. Dähler (1987) estudou este efeito, realizando experimentos práticos com a câmara HR 600. A câmara e o campo de teste utilizados permaneciam estáveis, e uma série de imagens eram coletadas. Após a coleta das

imagens, as coordenadas dos pontos lidos foram observadas e a análise do seu comportamento mostrou a existência de efeitos sistemáticos.

A figura 3.5 mostra este comportamento para um determinado ponto.

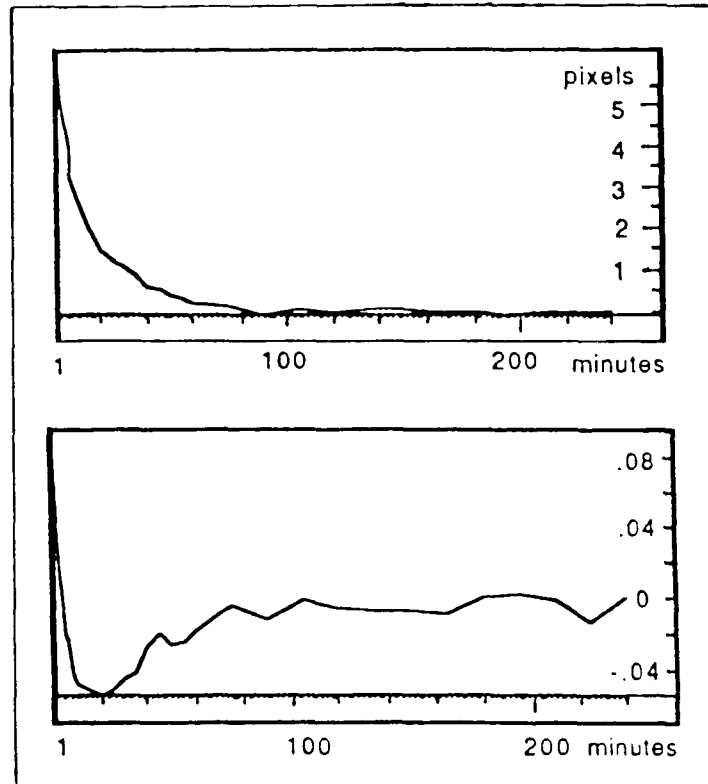


Fig. 3.5 – Comportamento das coordenadas x e y em função do tempo. O gráfico superior corresponde ao comportamento na direção x , o inferior ao y . Adaptado de Dähler (1987).

Como pode ser observado pelos gráficos mostrados na figura acima, nota-se que as imagens adquiridas logo a partir do instante em que a câmara é ligada, apresentam translações nas direções x e y . Com o passar do tempo essas translações diminuem, até se estabilizarem em torno de zero. Dähler admitiu que esse efeito é provocado pelo aumento da temperatura causado pela dissipação de energia dos circuitos

da câmara. O *drift* observado por Dähler mostrou uma componente maior na direção x, sendo que este efeito pode ser explicado pelo fato de que o aumento da temperatura provoca uma alteração na oscilação do cristal, provocando a mudança da frequência da câmara.

O efeito de aumento de temperatura pode ser minimizado se forem tomados cuidados no sentido de adquirir imagens apenas a partir do instante em que a estabilidade térmica interna da câmara for atingida. Para o caso da câmara estudada por Dähler (HR - 600), o tempo de estabilidade é de aproximadamente duas horas.

CAPÍTULO 4

CALIBRAÇÃO

4.1 Introdução

A calibração pode ser entendida como sendo um procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmara, os quais permitem a reconstituição do feixe perspectivo que deu origem a imagem. A partir desta definição pode-se observar que a calibração de câmaras ocupa um espaço fundamental na fotogrametria.

Segundo o conceito genérico apresentado por Eisenhart, a calibração de instrumentos consiste, basicamente, em uma maneira refinada de efetuar medidas. Para isso, as operações de medição devem ser conduzidas de modo que seja apresentado um valor representativo da grandeza observada, bem como uma estimativa da precisão deste valor. Num procedimento de calibração busca-se determinar certas características do objeto de calibração. Portanto, deve-se tomar o cuidado de conduzir as operações de calibração em condições ambientais e operacionais semelhantes aquelas mantidas durante o uso normal dos equipamentos. Além disso, é necessário que se tenha o

controle da técnica utilizada.

Com o desenvolvimento da fotogrametria digital, da fotogrametria em tempo real, da visão de máquina, etc, está se passando para uma fase na qual os dispositivos de aquisição de dados estão mudando completamente de características. Esta fase de transição que a fotogrametria atravessa, pode ser comparada à transição das técnicas analógicas para as analíticas onde os equipamentos analógicos deram lugar aos *analytical plotters*, a poucas décadas atrás.

Com a modernização dos dispositivos de aquisição de dados, as técnicas de calibração devem ser revistas, pesquisadas e atualizadas, visando sua aplicação nestes dispositivos. Tais pesquisas são essenciais, pois algumas das fontes de erro nas câmaras digitais, conforme mostrado no capítulo anterior, são completamente diferentes das fontes de erros apresentadas por uma câmara convencional. É lógico que os estudos feitos para as câmaras métricas e não métricas não podem ser esquecidos, pois a teoria desenvolvida para explicar as distorções provocadas pelo sistema de lentes são as mesmas.

É com este enfoque que técnicas de calibração de câmaras digitais estão sendo estudadas e testadas pela comunidade internacional.

4.2 Sistemas de Referência

Antes de apresentar as técnicas de calibração será feita a descrição de alguns dos sistemas de referência envolvidos neste processo. Pode-se, a princípio, dividir os sistemas de referência utilizados na fotogrametria em sistemas instrumentais, sistemas do espaço imagem e sistemas do espaço objeto.

Os sistemas instrumentais, como o próprio nome diz, referem-se aos sistemas solidários aos instrumentos. No presente caso, as medidas são feitas sobre imagens digitais, e portanto os instrumentos de medição utilizados são os computadores, ao invés de mono ou estéreo comparadores, como é usual em fotogrametria analítica.

As coordenadas dos pontos de interesse, são fornecidas em pixels do *frame buffer*, e a origem deste referencial, na maioria das vezes, situa-se no canto superior esquerdo da imagem. Normalmente, as coordenadas dos pontos obtidas da imagem são chamadas de coordenadas do *frame buffer*, ou simplesmente coordenadas de imagem. Considerando um ponto genérico P , as suas coordenadas podem ser representadas por $P(x_f, y_f)$, onde x_f varia ao longo das linhas com sinal positivo, da esquerda para a direita, e y_f ao longo das colunas com sinal positivo, a partir da parte superior.

Além do sistema de coordenadas do *frame buffer*, será

definido um sistema paralelo a este e dextrógiro, com origem no pixel central da imagem (x_c, y_c) , e com o eixo y_f' refletido em relação ao eixo y_f do sistema do *frame buffer*. Neste sistema as coordenadas de um ponto genérico P serão representadas por (x_f', y_f') , e será chamado de sistema com origem no centro do *frame*.

Para transformar as coordenadas de um ponto qualquer do sistema de imagem para o sistema com origem no centro do *frame*, basta que sejam feitas uma translação e uma reflexão:

$$\begin{bmatrix} x_f' \\ y_f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_c \\ y_f - y_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde:

- x_f, y_f - coordenadas no sistema de imagem;
- x_c, y_c - coordenadas do centro da imagem e
- x_f', y_f' - coordenadas com origem no ponto (x_c, y_c) .

A segunda categoria de sistemas de referência, diz respeito aos sistemas do espaço imagem. Espaço imagem pode ser considerado como o espaço compreendido entre o ponto nodal posterior do sistema de lentes e o plano do negativo (Lugnani, 1987). Esta definição é apropriada para o caso de câmaras convencionais, e pode ser utilizada também para câmaras digitais, onde deve-se substituir "plano do negativo" por "plano dos sensores". Os sistemas de referência do espaço imagem são sistemas tridimensionais (3D), dextrógiros e com a

sua origem no centro perspectivo. Fazendo uma analogia com os sistemas do espaço imagem utilizados em fotogrametria analítica, pode-se comparar o sistema fotográfico de coordenadas do negativo (Lugnani, 1987), com o sistema da câmara. O sistema fotográfico de coordenadas do diapositivo, ou sistema fotogramétrico, corresponde ao sistema fotogramétrico associado a imagem, o qual pode ser definido da seguinte maneira:

- . origem - no ponto nodal anterior;
- . eixo x - paralelo ao eixo x_f do sistema de imagem e de mesmo sentido;
- . eixo y - paralelo ao eixo y_f do sistema de imagem e de sentido contrário;
- . eixo z - tal que o sistema seja dextrógiro.

A projeção ortogonal do centro perspectivo sobre o plano dos sensores determina o ponto principal. Para o caso de sistemas óticos de boa qualidade e lentes com eixos óticos bem alinhados, este ponto localiza-se bem próximo ao centro da matriz de sensores e obviamente, do centro da imagem.

A figura 4.1 ilustra o sistema do *frame buffer*; o sistema com origem no centro do *frame*; o sistema da câmara e o sistema fotogramétrico associado a imagem (sistema fotogramétrico).

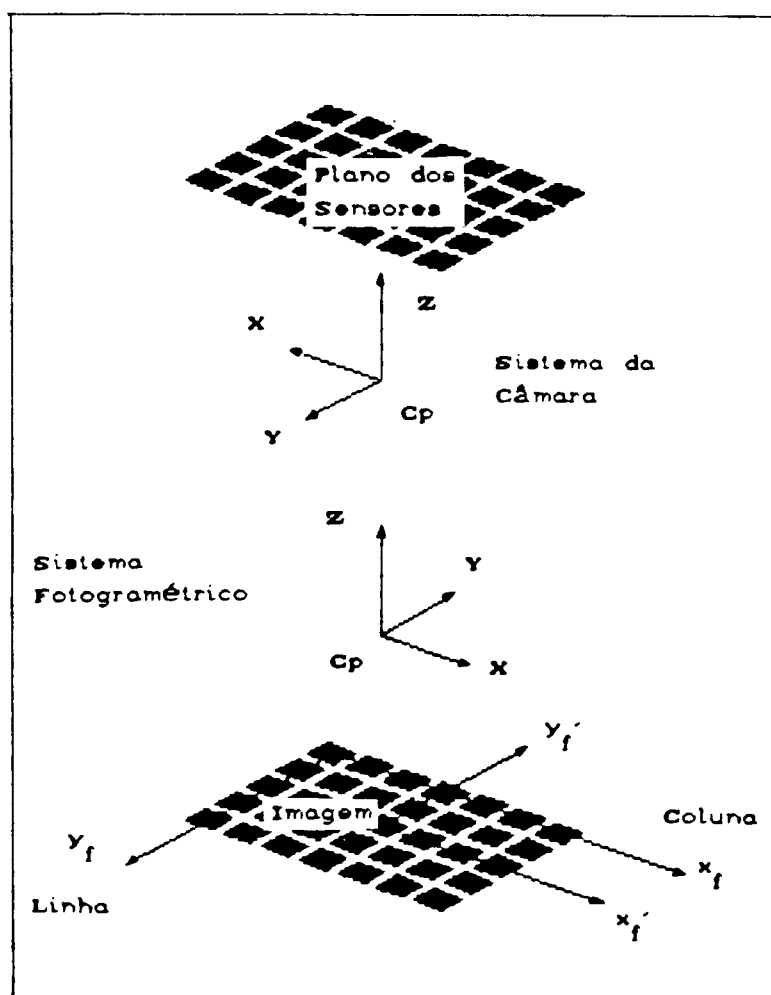


Fig. 4.1 - Sistema da câmara, sistema fotogramétrico, sistema do *frame buffer* e sistema com origem no centro do *frame*.

Considerando que as coordenadas de um ponto da imagem sejam (x_f, y_f) , para transformar as coordenadas deste ponto para o sistema fotogramétrico, deve-se fazer uma translação para o centro da imagem, uma translação para o ponto principal e uma reflexão em y_f .

Matricialmente, estas translações, seguidas pela

reflexão, podem ser representadas por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_c - x_o \\ y_f - y_c + y_o \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde:

- . x, y - coordenadas no sistema fotogramétrico;
- . x_f, y_f - coordenadas no sistema de imagem;
- . x_c, y_c - coordenadas do centro da imagem;
- . x_o, y_o - coordenadas do ponto principal, em relação ao centro da imagem.

Para expressar a equação (4.2) em milímetros é necessário multiplicar as coordenadas x e y por fatores de escala que façam a conversão da unidade pixel imagem, para mm. Deste modo, (4.2) passa a ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \cdot dx & 0 \\ 0 & dy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_c - x_o \\ y_f - y_c + y_o \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

onde:

- . dx, dy - espaçamento entre os pixels (no sensor), nas direções x e y respectivamente,
- . S_x - fator de escala utilizado para determinar o espaçamento dos sensores no *frame buffer*.

Lembrando que a coordenada z dos pontos da imagem, no sistema fotogramétrico tem o valor $-f$, pode-se escrever (4.3)

como segue:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sx.dx & 0 & 0 \\ 0 & dy & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_c - x_o \\ y_f - y_c + y_o \\ -f \end{bmatrix}$$

ou ainda, de modo mais compacto:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sx.dx & 0 & 0 \\ 0 & -dy & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f - x_c - x_o \\ y_f - y_c + y_o \\ -f \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

onde:

. f - distância focal.

Finalmente, os sistemas de coordenadas do espaço objeto são sistemas cartesianos, tridimensionais, e na maioria das vezes, dextrógiros. O usuário tem liberdade de escolher este sistema do modo que for mais conveniente para a sua aplicação. Portanto a origem e a orientação são arbitrárias, desde que em todo procedimento de calibração as convenções sejam mantidas.

4.3 Técnicas de Calibração

São várias as técnicas que vem sendo utilizadas na calibração de câmaras CCD. Dentre elas, as que merecem destaque são: auto-calibração por feixes de raios e o método de Tsai em dois estágios. Além destes, modelos como a DLT (Transformação Linear Direta) são utilizados, apesar de não ser rigorosamente um modelo de calibração e sim de

parametrização, pois nem todos os parâmetros recuperados representarem explicitamente uma grandeza com significado físico, mas sim um agrupamento de parâmetros. Outras técnicas são comuns em visão, como por exemplo, a utilização da transformação projetiva, expressa em coordenadas homogêneas (Tommaselli, 1991).

Considerando as necessidades específicas de calibração em tempo real (ou calibração dinâmica) para alguns sistemas de robótica e visão de máquina, métodos mistos são também utilizados, como por exemplo, o método de Tsai com a aplicação de técnicas de filtragem Kalman (Liang *et alii*, 1989; Lenz & Tsai, 1989). Nestes casos, as técnicas utilizadas devem ser suficientemente rápidas a fim de permitir, por exemplo, o posicionamento, a orientação e o deslocamento de robôs. Uma diferença entre estes procedimentos e os utilizados especificamente em fotogrametria, referem-se aos sistemas de referência, onde se inclui sistemas associados aos robôs (Liang *et alii*, 1989; Lenz & Tsai, 1989).

Uma das observações feitas ao se pesquisar a literatura, refere-se ao fato de não existir uma homogeneidade na simbologia utilizada. Por isso, na medida do possível, tentar-se-á expor os métodos utilizando uma nomenclatura unificada.

4.3.1 Auto-calibração Utilizando o Modelo de Colinearidade

A calibração, conforme definida anteriormente, preocupa-se com a determinação de elementos que permitam a reconstituição dos feixes de raios, sendo que estes parâmetros podem ser: f , x_0 , y_0 , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 e P_2 . Na realidade são inúmeros os modelos que podem ser utilizados. Os mais comumente usados para a modelagem das distorções das lentes, são os apresentados no item 3.2. Para o caso de câmaras digitais, alguns destes parâmetros não são muito significativos, ao passo que outros parâmetros devem ser considerados, como é o caso do fator de escala horizontal. Resta saber qual é o modelo matemático que proporciona os melhores resultados para a calibração deste tipo de câmara.

Alguns autores referem-se aos parâmetros inerentes à câmara como sendo os parâmetros intrínsecos, enquanto aqueles que definem a posição e orientação da câmara, em relação ao referencial do espaço objeto, como extrínsecos.

Pode-se considerar a auto-calibração como sendo o procedimento de determinação dos parâmetros intrínsecos, extrínsecos, e de alguns pontos do espaço objeto, simultaneamente. Se todos os pontos do espaço objeto tiverem suas coordenadas conhecidas, e forem determinados apenas os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, este procedimento pode ser chamado de pré-calibração (ou simplesmente calibração, como é comumente referido), permitindo então que esses

parâmetros sejam utilizados posteriormente para o refinamento das coordenadas.

No caso de câmaras digitais e câmaras não métricas a operação de pré-calibração não é muito comum, pois alguns dos parâmetros estão relacionados com a distância focal, que pode ser diferente para cada imagem, tornando-se adequada a execução da auto-calibração (*self-calibration*). Na realidade, se forem conhecidos os coeficientes de distorção para duas distâncias focais diferentes, pode-se determinar estes coeficientes para qualquer outro valor de f (Brown, 1971). O inconveniente desta técnica é que o problema passa a ser a determinação preliminar de f , para uma posterior compensação das distorções. Nas situações em que a(s) câmara(s) é(são) mantida(s) fixa(s) e a focalização também é mantida, a pré-calibração pode ser utilizada.

4.3.1.1 Modelo de Colinearidade

O modelo matemático funcional utilizado na auto-calibração é o modelo de colinearidade, juntamente com os parâmetros adicionais. O modelo de colinearidade baseia-se na condição de que o centro perspectivo, o ponto imagem e o ponto objeto correspondente, sejam colineares.

Este modelo pode ser escrito da seguinte maneira:

$$x = -f \frac{m_{11}(X-X_{cp}) + m_{12}(Y-Y_{cp}) + m_{13}(Z-Z_{cp})}{m_{31}(X-X_{cp}) + m_{32}(Y-Y_{cp}) + m_{33}(Z-Z_{cp})} \quad (4.5)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X-X_{cp}) + m_{22}(Y-Y_{cp}) + m_{23}(Z-Z_{cp})}{m_{31}(X-X_{cp}) + m_{32}(Y-Y_{cp}) + m_{33}(Z-Z_{cp})}$$

onde:

- . x, y - coordenadas no sistema fotogramétrico;
- . f - constante da câmara;
- . m_{ij} - elementos da matriz de rotação (M), onde admite-se a seguinte sequência de rotações: $M = M_z(\kappa)M_y(\phi)M_x(\omega)$ sendo que $M_x(\omega)$, $M_y(\phi)$ e $M_z(\kappa)$ representam respectivamente: rotação primária, secundária e terciária. Deste modo, pode-se escrever,

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\phi \cos\kappa \\ m_{12} &= \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa \\ m_{13} &= \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa \\ m_{21} &= -\cos\phi \sin\kappa \\ m_{22} &= \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa \\ m_{23} &= \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa \\ m_{31} &= \sin\phi \\ m_{32} &= -\sin\omega \cos\phi \\ m_{33} &= \cos\omega \cos\phi; \end{aligned}$$
- . (X, Y, Z) - coordenadas dos pontos no espaço objeto e
- . (X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}) - coordenadas do centro perspectivo no espaço objeto.

Os ângulos ω (omega), ϕ (phy) e κ (kapa) são ângulos que permitem tornar o sistema de coordenadas do espaço objeto paralelo ao sistema fotogramétrico associado a imagem. O ângulo ω , corresponde a uma rotação em torno do eixo X , enquanto que os demais, ϕ e κ , referem-se a rotações em torno

de Y e Z, respectivamente. As rotações adotadas são positivas no sentido anti-horário e as matrizes de rotação são passivas.

A figura 4.2 ilustra a condição de colinearidade.

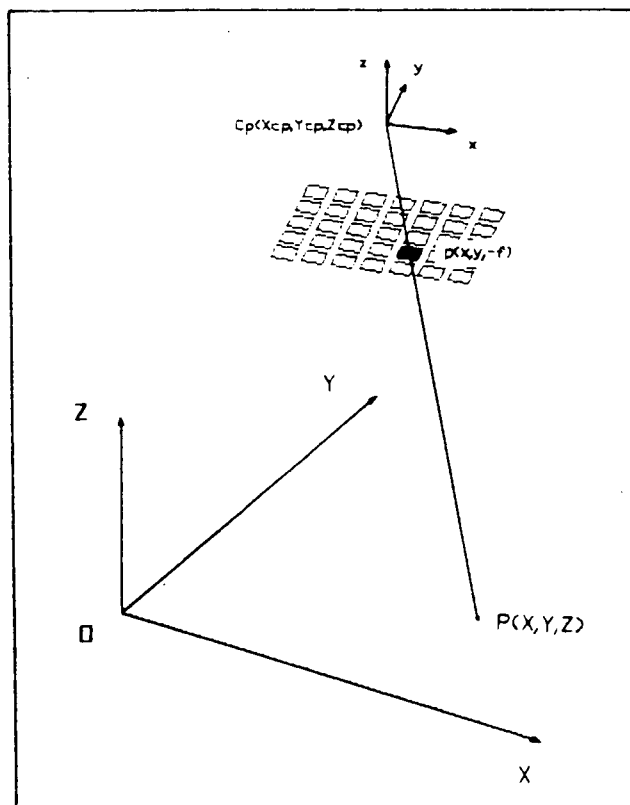


Fig. 4.2 - Condição de colinearidade.

4.3.1.2 Modelo Matemático Funcional

Admitindo a distorção radial simétrica e a distorção descentrada como causas dos erros sistemáticos, pode-se escrever o modelo de erro como sendo:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \delta x_r + \delta x_d \\ \Delta y &= \delta y_r + \delta y_d\end{aligned}\tag{4.6}$$

Considerando-se a influência destes erros na equação (4.5), tem-se o modelo matemático funcional utilizado na auto-calibração:

$$x_f' = x_o + \Delta x - f \frac{m_{11}(X-X_{cp}) + m_{12}(Y-Y_{cp}) + m_{13}(Z-Z_{cp})}{m_{31}(X-X_{cp}) + m_{32}(Y-Y_{cp}) + m_{33}(Z-Z_{cp})} \quad (4.7)$$

$$y_f' = y_o + \Delta y - f \frac{m_{21}(X-X_{cp}) + m_{22}(Y-Y_{cp}) + m_{23}(Z-Z_{cp})}{m_{31}(X-X_{cp}) + m_{32}(Y-Y_{cp}) + m_{33}(Z-Z_{cp})}$$

Neste modelo poderia ser incluído o fator de escala horizontal, entretanto optou-se pelo cálculo deste parâmetro da maneira proposta por Tsai, o que será visto posteriormente. No caso de câmaras métricas, onde a distância focal é mantida fixa durante as exposições e no qual supõe-se que a câmara seja estável, pode-se considerar que os parâmetros, f , x_o , y_o , K_1 , K_2 , K_3 , P_1 e P_2 , permaneçam inalterados. Assim sendo, para um bloco de n fotografias, o número de parâmetros de calibração seria 8. Para o caso das câmaras digitais, onde pode-se ter diferentes focalizações para cada imagem, o número de parâmetros de calibração varia em função do número de imagens tomadas e logicamente dos parâmetros adicionais utilizados.

Uma observação interessante em relação a equação (4.7) é que os elementos x_f' , y_f' , x_o , y_o , Δx , Δy e f podem tanto ser expressos em milímetros, quanto em pixels. Por isso os fatores de escala presentes na 4.4 não foram incluídos. Este

assunto será discutido posteriormente.

No modelo expresso pela equação (4.6) admitiu-se como causa dos erros sistemáticos a distorção radial simétrica e a distorção descentrada. Além desses elementos, pode-se considerar mais dois parâmetros de afinidade que modelam a não perpendicularidade dos eixos do comparador (não considerado no caso de imagens digitais) e diferenças de escala nos eixos x e y. Este modelo foi apresentado por Moniwa (1972), para a auto-calibração de câmaras não métricas e as expressões abaixo dão as componentes de afinidade nas direções x e y:

$$\begin{aligned}\delta x_a &= A.(y_f' - y_o) \\ \delta y_a &= B.(y_f' - y_o)\end{aligned}\tag{4.8}$$

Na dedução das expressões anteriores admite-se que não há variação de escala na direção x, que existe um diferencial de escala (ds) ao longo de y, e que o eixo y real forma um ângulo β com o eixo y ideal, de modo que A e B podem ser escritos como função de ds e β (Moniwa, 1972):

$$\begin{aligned}A &= (1 + ds) \sin(\beta) \\ B &= (1 + ds) \cos(\beta) - 1\end{aligned}\tag{4.9}$$

As expressões (4.8) e (4.9) podem ser modificadas para a utilização em câmaras digitais, caso queira ser determinado o fator de escala em x, para isso basta considerar que a escala é mantida em y e que existe um diferencial de escala na

direção x , deste modo a expressão (4.8) pode ser escrita como sendo (Tommasselli, 1990):

$$\begin{aligned}\delta x_a &= A'(x_f' - x_o) \\ \delta y_a &= B'(x_f' - x_o)\end{aligned}\tag{4.10}$$

Considerando-se (4.8) ou (4.10), o modelo de erro (4.6) pode ser expandido, de modo a incluir os parâmetros de afinidade:

$$\begin{aligned}\Delta x &= \delta x_r + \delta x_d + \delta x_a \\ \Delta y &= \delta y_r + \delta y_d + \delta y_a\end{aligned}\tag{4.11}$$

4.3.1.3 Considerações Sobre a Solução

A solução do modelo funcional, expresso pelas equações (4.7) pode ser feita através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), desde que se tenha superabundância de observações. Esta técnica propicia, além do cálculo dos parâmetros ajustados, a sua matriz variância covariância, permitindo determinar os desvios padrão dos parâmetros, bem como verificar a ocorrência de altas correlações.

Um cuidado que deve ser tomado na resolução de sistemas lineares é com a ocorrência de dependência linear entre linhas e/ou colunas, causada, por exemplo, por correlação de parâmetros. Merchant (1980) e Andrade (1981) discutiram o problema da dependência linear e mostraram que a matriz das

derivadas parciais (A) apresenta dependência linear, quando são feitas observações sobre fotos verticais tiradas de campos de testes planos. O grau de dependência pode ser quantificado através do coeficiente de correlação, que varia no intervalo $(+1, -1)$. Quando o coeficiente de correlação assume valores extremos (± 1) a dependência é linear, indicando que existem parâmetros que são linearmente dependentes, ou seja, que a variação de um deles sobre o modelo matemático é compensada pela variação do outro.

Uma maneira de quebrar eventuais correlações consiste em tomar-se imagens com grandes inclinações, destruindo assim a dependência linear do sistema. Uma outra maneira seria fazer imagens de superfícies com desníveis da ordem de 20% da distância alvo/câmara, ou mais, como preconiza Leigh (Andrade, 1981).

4.3.2 Método de Tsai

Este método foi originalmente proposto por Tsai em 1985 e sofreu posteriormente, algumas alterações propostas por Lenz em 1987. O método permite, segundo os autores, a determinação de todos os parâmetros da câmara, em tempo real e com precisão, utilizando-se de um campo de testes coplanar.

Os autores desta técnica dividem os parâmetros em dois grupos: o grupo dos parâmetros intrínsecos e dos parâmetros extrínsecos. O primeiro deles é composto dos seguintes

elementos:

- . fator de escala (S_x);
- . centro da imagem⁽³⁾ (c_x, c_y);
- . distância principal (f); e
- . coeficiente da distorção radial simétrica (k).

O segundo grupo é composto pelos seguintes parâmetros:

- . posição do centro perspectivo no sistema do espaço objeto (t_x, t_y, t_z) e
- . ângulos de orientação da câmara (α, ϕ, ω).

O método é dividido em duas fases. Na primeira delas alguns dos parâmetros extrínsecos (m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} , t_x e t_y) são determinados, enquanto que na segunda, são calculados os demais (f , f_k e t_z). Para tanto é necessário uma fase de pré-calibração, onde os parâmetros c_x , c_y e S_x são determinados.

4.3.2.1 Determinação do Fator de Escala

O fator de escala horizontal é utilizado para relacionar o espaçamento entre os pixels adjacentes na imagem, com o espaçamento entre os elementos sensores, na direção da linha de varredura (x), podendo-se escrever:

(3) Tsai utiliza o termo *centro da imagem* para se referir ao ponto principal.

$$dx = S_x \cdot dx_s \quad (4.12)$$

onde:

- . dx' - distância entre os pixels no *frame*;
- . S_x - fator de escala horizontal e
- . dx_s - distância entre os pixels adjacentes no sensor (expresso em mm).

Uma estimativa aproximada do fator de escala pode ser calculada a partir do número de elementos nas linhas do sensor e no *frame*:

$$S_x = \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \quad (4.13)$$

onde:

- . N_{cx} - número de elementos numa linha de sensores e
- . N_{fx} - número de elementos em uma linha, quando amostrada pelo computador.

Na realidade, o padrão de transmissão do sinal de vídeo impõe um intervalo de tempo para a transmissão de uma linha. Já o tempo de amostragem de uma linha no conversor A/D é diferente, o que faz com que a equação anterior seja válida apenas quando os intervalos de tempo mencionados forem iguais. Por outro lado, o fator de escala pode ser calculado, de

maneira rigorosa, a partir das frequências:

$$S_x = \frac{f_c}{f_i} \quad (4.14)$$

onde:

- . f_c - frequência de transmissão pela câmara e
 - . f_i - frequência de amostragem do conversor A/D.
- Também expressa por $f_{A/D}$.

O problema da determinação do fator de escala a partir da equação (4.14) está na necessidade de conhecer com precisão as frequências envolvidas, ou então, medi-las em laboratório. Isto implica na utilização de equipamentos específicos para a tomada de tais medidas.

Lens & Tsai (1986) desenvolveram um método para o cálculo do fator de escala, onde não são utilizados equipamentos específicos, além daqueles que compõem o sistema. Este método baseia-se no fato de que o sinal de saída da câmara é formado pela superposição do sinal correspondente aos níveis de cinza (informações pictoriais), de ruídos e de pequenos picos com a mesma frequência de transmissão da câmara. Posteriormente este sinal é reamostrado por um conversor A/D. A imagem aparece no *display* com um certo padrão, apresentando uma série de faixas verticais, que podem ser suprimidas por um filtro passa-baixa colocado entre a

camãra e o conversor A/D. A figura 4.3, extraída de Lenz & Tsai (1986), mostra as faixas geradas pela interferência entre o *clock* do conversor A/D e da câmara.

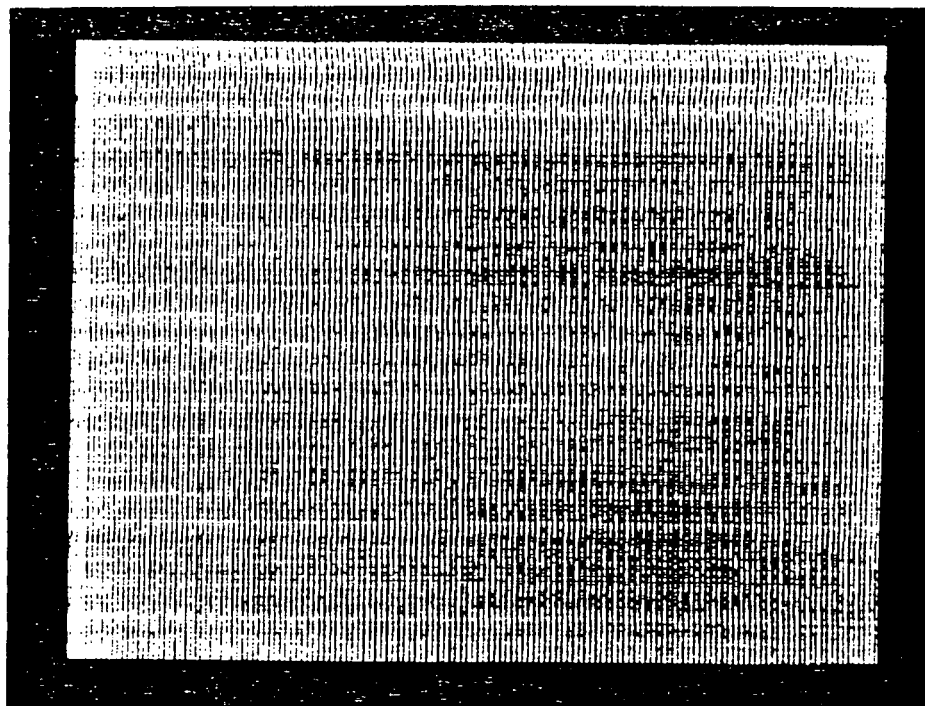


Fig. 4.3 - Faixas geradas pela interferência entre o *clock* do conversor A/D e da câmara (o contraste foi fortemente realçado). Adaptado de Lenz & Tsai (1986).

A frequência espacial (f_s) destas faixas (em períodos/pixels do *frame buffer*) corresponde a razão entre a diferença de frequências $|f_c - f_f|$ com a frequência f_f :

$$f_s = \frac{|f_c - f_f|}{f_f} \quad (4.15)$$

Para uma visualização deste padrão pode-se tomar a

imagem de um alvo "homogêneo", sob uma iluminação também homogênea, o que na prática não é muito fácil.

Considerando as equações (4.14) e (4.15) pode-se extrair S_x em função de f_s , ou seja:

$$S_x = 1 \pm f_s, \text{ sendo } \begin{cases} (+) \text{ para } f_f < f_c \text{ ou } N_{fx} < N_{cx} \\ (-) \text{ para } f_f > f_c \text{ ou } N_{fx} > N_{cx} \end{cases} \quad (4.16)$$

A frequência espacial pode ser determinada através da análise do espectro $S_i(0, \dots, N-1)$, resultante da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) a uma determinada linha i da imagem. O espectro de amplitude $AS_i(0, \dots, N-1)$ resultante, apresenta vários picos, sendo que a frequência f_s pode ser determinada a partir da análise deste sinal. Para isso deve-se, primeiramente, determinar o valor de f_s aproximado (f_s^0) o qual pode ser obtido pela (4.16) escrita como ($S_x^0 = 1 \pm f_s^0$), onde S_x^0 é o valor aproximado de S_x , que pode ser calculado previamente por (4.13) ou (4.14). Posteriormente, o valor de f_s é obtido pela procura do pico de máxima amplitude numa vizinhança da posição esperada (f_s^0). A abscissa desse pico (m) expressa em períodos/pixel do *frame buffer*, representa a frequência f_s esperada.

Para a determinação de um valor mais acurado para f_s (Lenz & Tsai, 1986; Lenz & Tsai, 1988), apresentam:

$$f_s = \frac{AS(m-1)f_{s-} + AS(m+1)f_{s+}}{AS(m-1) + AS(m+1)} \quad (4.17)$$

onde:

$$f_{s-} = \frac{1}{N} \left\{ m + \text{real} \left[\frac{S(m-1)}{S(m) - S(m-1)} \right] \right\} \quad (4.17a)^{(4)}$$

$$f_{s+} = \frac{1}{N} \left\{ m + \text{real} \left[\frac{S(m+1)}{S(m+1) - S(m)} \right] \right\} \quad (4.17b)^{(4)}$$

. m - número inteiro que representa o índice correspondente à posição do pico de máxima amplitude (mais próximo de f_s^0).

Observando-se a expressão (4.17), pode-se notar que esta representa uma média ponderada das frequências f_{s-} e f_{s+} .

Para o cálculo de f_s deve-se adquirir a imagem de um alvo, o mais homogêneo possível e, após o cálculo de f_s para cada linha desta imagem, calcular o valor final de f_s pela média dos valores de f_{si} de cada linha. Desse modo, determina-se um valor representativo de f_s para toda a imagem. Pode-se então calcular S_x através da equação (4.16). Uma opção mais prática consiste em calcular a FFT para uma única linha

(4) Os elementos $S(i)$ presentes nas equações (4.17a) e (4.17b) são números complexos. Assim a parcela real $[S(m-1)/(S(m) - S(m-1))]$ representa a parte real resultante da divisão de $S(m-1)$ por $(S(m)-S(m-1))$. Maiores detalhes sobre "divisão" de números complexos são apresentados no anexo A.

da imagem, a linha média. Este procedimento é menos trabalhoso em termos computacionais uma vez que é realizada apenas uma Transformada de Fourier, ao passo que no primeiro caso, deve ser feita uma transformação para cada linha da imagem, e só então calcular a média das diversas f_{si} .

Se considerarmos uma função contínua $s(t)$, onde o domínio é o tempo(ou espaço), a sua Transformada de Fourier pode ser calculada por:

$$\mathcal{F}[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.18)$$

onde:

- . $\mathcal{F}[s(t)] = S(\omega)$, representação de $s(t)$ no domínio da frequência;
- . j , unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$);
- . ω , frequência em Hz(para t em segundos).

A função $S(\omega)$ é geralmente complexa e pode ser escrita na forma:

$$S(\omega) = R(\omega) + j.I(\omega) \quad (4.19)$$

ou ainda:

$$S(\omega) = AS(\omega)e^{j\phi(\omega)} \quad (4.20)$$

sendo que R , I , AS e ϕ são funções reais. A função $R(\omega)$ é a parte real de $S(\omega)$ enquanto que $I(\omega)$ é a parte imaginária. O espectro de amplitude $AS(\omega)$, ou espectro de Fourier, é o valor absoluto de $S(\omega)$ que pode ser dado por:

$$AS(\omega) = [R^2(\omega) + I^2(\omega)]^{1/2} \quad (4.21)$$

A função ϕ , em (4.20) representa o ângulo de fase e pode ser calculado da seguinte maneira:

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{I(\omega)}{R(\omega)} \right] \quad (4.22)$$

A expressão (4.18) é utilizada para o cálculo da Transformada de Fourier de funções contínuas, o que não é o caso neste trabalho, pois a imagem é composta por elementos discretos. Quando se trabalha com valores discretos, deve-se utilizar a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*) que é apenas um caso particular da Transformada de Fourier. No anexo B apresenta-se uma das subrotinas que possibilita o cálculo da FFT. Como referências pode-se recomendar: Brigham (1974), Gonzales (1987), Press et alii (1986), entre outros.

Uma aplicação interessante da (4.22) está no cálculo do *line jitter*. O princípio baseia-se no cálculo do ângulo de fase (ϕ) para cada uma das linhas, utilizando o coeficiente espectral $S_i(m)$ com a máxima amplitude, como definido

anteriormente (Lenz & Tsai, 1986; Lenz & Tsai, 1988).

Para o cálculo do fator de escala pode-se aplicar a FFT-1D para a linha média de uma imagem tomada de um alvo homogêneo, como mencionado anteriormente. Para que as bordas da imagem não afetem o valor de S_x , tem-se duas opções:

- . calcular o fator de escala para um número menor de pixels de uma mesma linha, ao invés de utilizar toda a linha, desprezando os pixels próximos das bordas da imagem.
- . utilizar toda a linha e aplicar uma função de ponderação (FP) que minimize os tons de cinza dos pixels mais próximos das bordas.

Neste caso pode ser utilizada uma função do tipo:

$$FP(x_i) = \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi x_i}{N}\right)}{j} \quad (4.23)$$

onde:

- . x_i - representa a posição i dentro de uma linha de N elementos ($i=0, \dots, N-1$).
- . j - representa um escalar relacionado com o intervalo $((\max(FP) - \min(FP)))$ da função peso. Por exemplo:

$$j=1 \rightarrow \min(FP)=0 \text{ e } \max(FP)= 2$$

$$j=2 \rightarrow \min(FP)=0 \text{ e } \max(FP)= 1$$

Isto significa que, para a utilização de uma ponderação

mais suave, recomenda-se valores maiores para j . Lenz & Tsai (1985) utilizam $j=1$. Definido o valor a ser utilizado deve-se multiplicar o valor do tom de cinza de um pixel da coluna i , representado por $g(x_i)$, por $FP(x_i)$ obtendo-se assim, um novo tom de cinza para o mesmo pixel. Este vetor resultante será utilizado para o cálculo do Espectro de Amplitudes, e posteriormente para a determinação do fator de escala.

A figura 4.4 exemplifica a função de ponderação para $N=512$ e $j=1$.

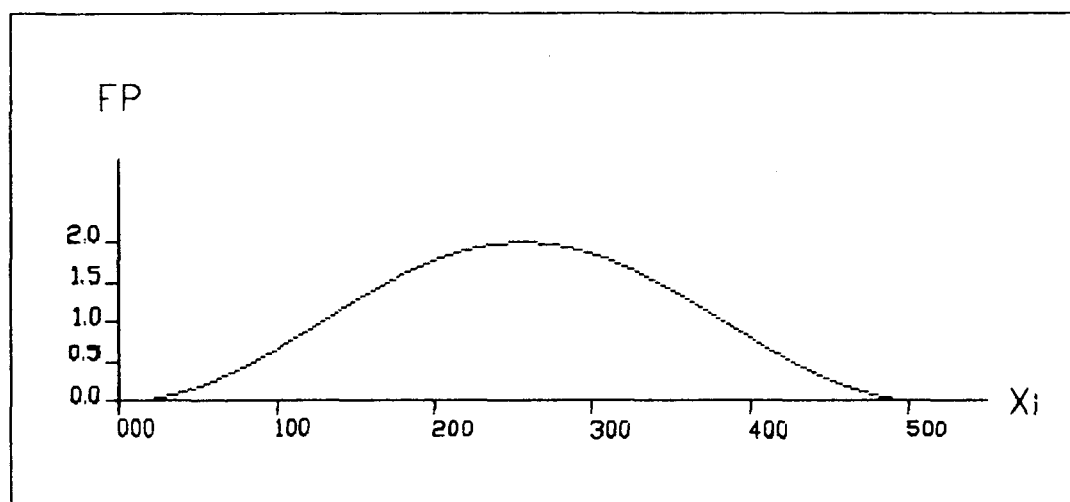


Fig. 4.4 - Função de ponderação para $N=512$ e $j=1$.
 $FP(x_i) = 1 - \cos(2\pi \cdot x_i / N)$

4.3.2.2 Determinação do Centro da Imagem

Além do fator de escala, é necessário dispor-se, também, da posição do centro da imagem para a transformação das coordenadas de um ponto referido ao sistema do frame buffer para o sistema fotogramétrico. O ponto principal é a projeção do centro perspectivo sobre a imagem. Em trabalhos

experimentais citados na literatura (Lenz, 1987) foram observadas diferenças da ordem de até algumas dezenas de *pixels* entre o ponto principal, e o centro do *frame*, podendo-se concluir que, para cálculos de precisão, a adoção do centro do *frame buffer* como centro da imagem (ponto principal) não é aconselhável.

Tsai (Lenz & Tsai, 1986; Lenz & Tsai, 1988) divide os métodos para a calibração do ponto principal em três grupos:

Grupo I - Método Ótico Direto.

Grupo II - Método da Variação da Distância Focal.

Grupo III - Método da Restrição de Alinhamento Radial.

No Método Ótico Direto proposto, a posição do ponto principal é determinada a partir da utilização de uma fonte de LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), sendo baseado na reflexão de um feixe luminoso sobre uma superfície ótica. Ao se apontar um feixe de raios sobre uma superfície, parte da luz é refletida quando o feixe incide nesta superfície e também quando o feixe a atravessa. Colocando-se um anteparo com um pequeno orifício em frente a câmara e fazendo que o feixe de raios LASER atravessasse o orifício, pode-se observar a ocorrência de múltiplas reflexões na superfície ótica. Ajustando o feixe luminoso até o instante em que a reflexão coincida com o feixe incidente, tem-se o feixe de luz "alinhado" ao eixo ótico. Neste instante, pode-se colocar um filtro de atenuação entre a fonte de geração do

LASER e a câmara e então ligá-la. A imagem do feixe luminoso, que agora tem a direção do eixo ótico, aparecerá na tela e o pixel central desta feição pode ser usado como ponto principal (centro da imagem).

O Método Ótico Direto fornece resultados acurados, mas apresenta a desvantagem de necessitar de equipamentos específicos, como uma fonte de LASER.

O Método da Variação da Distância Focal baseia-se no fato de que, se a distância focal é alterada a imagem sofre um efeito de *zoom*, sendo que o único ponto que não sofre deslocamento é o ponto principal. Este ponto pode ser calculado fazendo-se a interseção de retas definidas a partir da posição dos pontos em dois momentos, antes e após a alteração da distância focal. A variação da distância focal pode ser feita de duas maneiras: pela alteração da focalização da câmara ou pela troca de lentes de diferentes focais. O primeiro deles é o menos preciso, enquanto que no segundo existe o inconveniente de que a câmara pode se mover durante a troca de lentes, ou então do encaixe da mesma não ser perfeito.

No terceiro grupo Tsai utiliza o método da restrição de alinhamento radial (RAC - *Radial Alignment Constraint*), sendo baseado no fato de que na presença de distorção radial, o ponto na posição real (com distorções), o ponto na posição ideal(sem distorções) e o centro da imagem estão radialmente

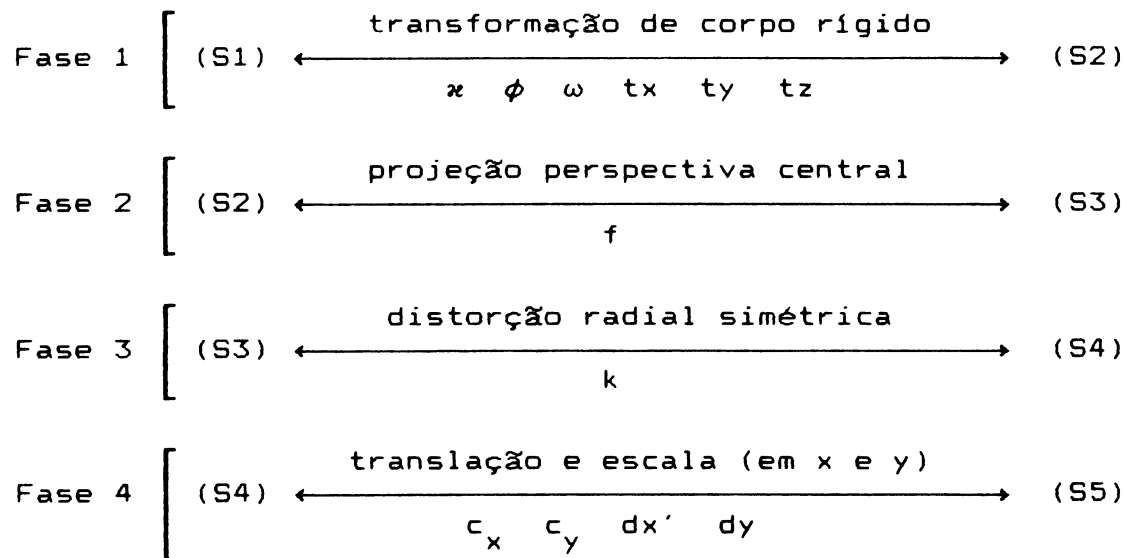
alinhados. O centro da imagem pode ser calculado pela expressão (4.28), apresentada na sequência, considerando que o erro residual é mínimo quando o centro da imagem é determinado adequadamente (maiores detalhes em Lenz & Tsai, 1986; Lenz, 1987).

4.3.2.3 Calibração

Antes de descrever o método, serão feitas algumas convenções no sentido de facilitar o seu entendimento. Nesta técnica estão envolvidos basicamente cinco sistemas. O sistema do espaço objeto (S1), o sistema da câmara (S2), o sistema de imagem, livre de distorções (S3), o sistema de imagem considerando as distorções (S4) e o sistema do *frame buffer* (S5). As coordenadas dos pontos em cada um desses sistemas podem ser representadas por:

- . (S1) - (X, Y, Z) Sistema do Espaço Objeto
- . (S2) - (x', y', z') Sistema da Câmara
- . (S3) - (x, y) Sistema de Imagem (sem distorções)
- . (S4) - (x_d, y_d) Sistema de Imagem (com distorções)
- . (S5) - (x_f, y_f) Sistema do *frame buffer*

Para se fazer as transformações envolvendo os cinco sistemas, deve-se passar por 4 fases, onde em cada uma delas, alguns parâmetros são considerados. As transformações e os seus respectivos parâmetros são esquematicamente mostrados na sequência:



Convém observar que estas fases são análogas ao procedimento convencional. As fases 1 e 2, por exemplo, podem ser expressas apenas pelas equações de colinearidade. Na fase 4, são mostrados os elementos dx' e dy que, a princípio, não foram incluídos no conjunto dos parâmetros intrínsecos. O fator dy é conhecido diretamente a partir de especificações do fabricante enquanto que dx' é calculado em função de dx e do fator de escala (S_x), num procedimento denominado pré-calibração.

Para a primeira fase tem-se a transformação de corpo rígido, dada por:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

onde,

- . m_{ij} - elementos da matriz de rotação;
- . t_x, t_y e t_z - translações, respectivamente em x, y e z .

Posteriormente, tem-se a transformação projetiva envolvendo o sistema da câmara ($x' \ y' \ z'$) e o sistema da imagem livre de distorções ($x \ y$), dada por:

$$\begin{aligned} x &= f \frac{x'}{z'} \\ y &= f \frac{y'}{z'} \end{aligned} \quad (4.25)$$

A terceira fase leva em consideração a distorção das lentes. Neste caso, apenas um dos coeficientes da distorção radial simétrica é utilizado. A expressão abaixo (Lenz, 1987; Lenz & Tsai, 1989), pode ser utilizada:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_d}{(1 + k r_d^2)} \\ y &= \frac{y_d}{(1 + k r_d^2)} \end{aligned} \quad (4.26)$$

onde:

$$r_d = (x_d^2 + y_d^2)^{1/2}$$

Finalmente, a transformação das coordenadas do sistema

de imagem distorcido (real) para o sistema do *frame buffer*, pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}x_f &= \frac{x_d}{dx'} + c_x \\y_f &= \frac{y_d}{dy} + c_y\end{aligned}\tag{4.27}$$

sendo a sua inversa:

$$\begin{aligned}x_d &= dx' \cdot (x_f - c_x) \\y_d &= dy \cdot (y_f - c_y)\end{aligned}\tag{4.27a}$$

Dividindo as equações (4.26), substituindo x e y pelos valores dados pelas equações projetivas (4.25) e por fim substituindo $(x' \ y')$ pelo seu valor extraído de (4.24) e fazendo a consideração de que os pontos P_i do espaço objeto tem as coordenadas $Z_i = 0$, chega-se a seguinte equação:

$$\begin{aligned}y_{di} \cdot X_i \cdot m_{11} + y_{di} \cdot Y_i \cdot m_{12} + y_{di} \cdot tx \\- x_{di} \cdot X_i \cdot m_{21} - x_{di} \cdot Y_i \cdot m_{22} - x_{di} \cdot ty = 0\end{aligned}\tag{4.28}$$

que, quando reescrita na forma matricial, para um total de n pontos, fica:

$$\begin{bmatrix} y_{d1} \cdot x_1 & y_{d1} \cdot y_1 & -x_{d1} \cdot x_1 & -x_{d1} \cdot y_1 & y_{d1} & -x_{d1} \\ y_{d2} \cdot x_2 & y_{d2} \cdot y_2 & -x_{d2} \cdot x_2 & -x_{d2} \cdot y_2 & y_{d2} & -x_{d2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{dn} \cdot x_n & y_{dn} \cdot y_n & -x_{dn} \cdot x_n & -x_{dn} \cdot y_n & y_{dn} & -x_{dn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ t_x \\ t_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Os parâmetros da (4.28) e (4.29) são $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, t_x$ e t_y . Se forem conhecidas as coordenadas de cinco pontos no espaço objeto, bem como as coordenadas "distorcidas" destes mesmos pontos, o problema pode ser solucionado, devendo-se lembrar que a matriz M é ortogonal. Neste caso deve ser incluída uma equação de injeção que imponha esta ortogonalidade. Lenz & Tsai propõe a seguinte equação:

$$\begin{aligned} & [(m_{11} + m_{22}) + (m_{12} - m_{21})]^{1/2} + \\ & [(m_{11} - m_{22}) + (m_{12} + m_{21})]^{1/2} = 2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

Com mais de cinco pontos pode-se aplicar o MMQ. Uma vez que os parâmetros acima são determinados os elementos restantes da matriz de rotação podem ser calculados em função das propriedades desta matriz.

O segundo estágio envolve a determinação dos elementos: f , $f.k$ e t_z . Igualando as equações (4.25) e (4.26), substituindo z pelo valor encontrado em (4.24) e fazendo a consideração de que $Z_i = 0$ (assumindo um campo de testes coplanar), pode-se escrever as seguintes equações para cada ponto i :

$$\begin{aligned}
 x'_i \cdot f + x'_i \cdot r_{di}^2 \cdot f \cdot k - x_{di} \cdot tz &= x_{di} \cdot (X_i \cdot m_{91} + Y_i \cdot m_{92}) \\
 y'_i \cdot f + y'_i \cdot r_{di}^2 \cdot f \cdot k - y_{di} \cdot tz &= y_{di} \cdot (X_i \cdot m_{91} + Y_i \cdot m_{92})
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \cdot x'_i &= X_i \cdot m_{11} + Y_i \cdot m_{12} + tx \\
 \cdot y'_i &= X_i \cdot m_{21} + Y_i \cdot m_{22} + ty \\
 \cdot r_{di} &= (x_{di}^2 + y_{di}^2)^{1/2}
 \end{aligned}$$

Deste modo, a partir de um conjunto de pontos de coordenadas (X,Y,Z) conhecidas, com as coordenadas (x_d, y_d) calculadas através de (4.27a) e os elementos m_{ij} pré-determinados, os parâmetros f , fk e tz podem ser determinados.

Expressando (4.31) em notação matricial, para um conjunto de n pontos, tem-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$\begin{bmatrix} x'_1 & x'_1 r_{d1}^2 & -x_{d1} \\ y'_1 & y'_1 r_{d1}^2 & -y_{d1} \\ \vdots & & \vdots \\ x'_n & x'_n r_{dn}^2 & -x_{dn} \\ x'_n & y'_n r_{dn}^2 & -y_{dn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f \\ f \cdot k \\ tz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{d1} (X_1 m_{91} + Y_1 m_{92}) \\ y_{d1} (X_1 m_{91} + Y_1 m_{92}) \\ \vdots \\ x_{dn} (X_n m_{91} + Y_n m_{92}) \\ y_{dn} (X_n m_{91} + Y_n m_{92}) \end{bmatrix}
 \tag{4.32}$$

As equações (4.28) e (4.31) são os modelos fundamentais utilizados no procedimento de calibração em dois estágios proposto por Lenz & Tsai (1986,1988). Como pode-se notar, as observações utilizadas em (4.28) são as coordenadas no espaço objeto e as coordenadas (x_d, y_d) , calculadas a partir das (4.27a), sendo necessário portanto o conhecimento prévio dos fatores de escala e da posição do ponto principal. O mesmo é válido para a resolução de (4.31) onde, além desses elementos, utiliza-se os elementos da matriz de rotação calculados na fase anterior.

4.3.3 Transformação Linear Direta

A DLT (*Direct Linear Transformation*), ou Transformação Linear Direta foi desenvolvida por H. M. Karara e Y. I. Abdel-Aziz no início da década de 70 na Universidade de Illinois (Atkinson, 1980), com o objetivo de aplicação em câmaras não métricas.

Nesta técnica, as coordenadas de comparador (no caso de câmaras digitais, coordenadas de imagem) são relacionadas com as coordenadas do espaço objeto, deixando de lado os sistemas de referência intermediários.

O método é baseado no seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned}
x + (x - x_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + [r^2 + 2(x - x_o)]P_1 \\
+ 2(x - x_o)(y - y_o)P_2 = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\
y + (y - y_o)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + [r^2 + 2(y - y_o)]P_2 \\
+ 2(x - x_o)(y - y_o)P_1 = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}
\end{aligned}
\tag{4.33}$$

onde:

- . x, y - coordenadas no sistema do comparador, ou coordenadas de imagem;
- . X, Y, Z - coordenadas referidas ao espaço objeto;
- . x_o, y_o - coordenadas do ponto principal no sistema do comparador.
- . K_1, K_2, K_3 - parâmetros para modelagem da distorção radial simétrica;
- . P_1 e P_2 - parâmetros para modelagem da distorção descentrada;
- . L_1, \dots, L_{11} - parâmetros da transformação e
- . $r^2 = x^2 + y^2$.

O número de parâmetros da equação acima é igual a 11, correspondentes aos termos L_1 a L_{11} , mais os coeficientes das equações que modelam as distorções das lentes. Com base em experimentos, Karara e Abdel-Aziz (Atkinson, 1980) concluíram que, para aplicações práticas, apenas o termo K_1 é suficiente para modelar as distorções óticas, pois não houve uma melhoria

significativa na exatidão, quando da inclusão dos termos K_2 , K_3 , P_1 e P_2 .

Eliminando os termos K_2 , K_3 , P_1 e P_2 em (4.33), considerando $x_0=0$ e $y_0=0$ e admitindo os erros residuais nas direções x e y como sendo r_x e r_y , respectivamente, pode-se escrever as seguintes equações:

$$\begin{aligned} L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - xXL_9 - xYL_{10} - xZL_{11} - xK_1'r^2 - x &= r_x \\ L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - yXL_9 - yYL_{10} - yZL_{11} - yK_1'r^2 - y &= r_y \end{aligned} \quad (4.34)$$

onde:

$$K_1' = K_1 \cdot A, \text{ com } A = L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1$$

Considerando o modelo como escrito anteriormente, e admitindo-se que as coordenadas $(X \ Y \ Z)_i$ dos pontos de apoio possuem desvio-padrão desprezíveis e que $(x \ y)_i$ são observações, pode-se representar o vetor dos parâmetros ajustado por:

$$X_a = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6 \ L_7 \ L_8 \ L_9 \ L_{10} \ L_{11} \ K_1']^T \quad (4.35)$$

Portanto, com seis pontos observados pode-se determinar uma única solução. Para efetuar o ajustamento pelo MMQ são necessários mais de seis pontos. Fazendo as considerações anteriores o modelo expresso pela (4.34) pode ser considerado

linear em relação aos parâmetros, não sendo necessário iterações no ajustamento. O procedimento descrito é chamado de solução direta, como pode-se perceber pela própria natureza da solução. No entanto procedimentos iterativos mais rigorosos podem ser também utilizados (Atkinson, 1980).

Uma vez que o vetor dos parâmetros é determinado para uma série de imagens, pode-se calcular as coordenadas $(X\ Y\ Z)$ de um ponto qualquer que aparece em mais de uma imagem, pela solução de um sistema de equações onde a incógnita passa a ser $(X\ Y\ Z)_i$ e os parâmetros $(L_1\ L_2\ L_3\ L_4\ L_5\ L_6\ L_7\ L_8\ L_9\ L_{10}\ L_{11}\ K_1')$ de cada imagem são conhecidos. Para isto é necessário observar as coordenadas de imagem do ponto de interesse nas imagens utilizadas e resolver o sistema. Uma outra maneira, seria a utilização de uma única imagem e o conhecimento de apenas uma coordenada no espaço objeto, por exemplo a coordenada Z de um conjunto de pontos coplanares. Neste segundo caso a solução pode ser feita por um sistema de apenas duas equações a duas incógnitas. Maiores detalhes sobre o ajustamento pelo MMQ são apresentados no anexo D.

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

5.1 Introdução

Com a finalidade de avaliar a qualidade geométrica da câmara CCD HR 600 da Universidade Federal do Paraná e com o objetivo de fazer a comparação entre alguns modelos, quatro experimentos foram realizados. O primeiro deles trata-se da determinação do fator de escala utilizando a técnica proposta por Lenz e Tsai. O segundo refere-se a determinação das coordenadas planimétricas de alguns pontos no espaço objeto utilizando uma transformação projetiva no plano (cujo modelo matemático e o ajustamento são discutidos no anexo C), o terceiro trata da utilização da DLT e o quarto experimento trata-se da auto-calibração. Ao final do capítulo são apresentados os princípios de um Sistema para o Controle de Qualidade, baseado na utilização de câmaras digitais.

5.2 Materiais

O material básico utilizado refere-se aos equipamentos do Laboratório de Fotogrametria Digital da Universidade

Federal do Paraná (UFPR) e do Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Os equipamentos da UFPR foram os seguintes:

- . microcomputador IBM-PC/AT com winchester de 30 Mbytes, dois monitores: um monocromático e outro colorido, co-processador aritmético 80287, 512 Kb de memória RAM e placa controladora de vídeo padrão EGA;
- . câmara digital de alta resolução HR-600, acompanhada de monitor branco e preto e ligada a uma placa de digitalização no microcomputador;
- . PC VISIONplus - *Frame Grabber* (Imaging Technology Inc.), ITEX PCplus (biblioteca de subrotinas para processamento de imagens);
- . tripé para suporte da câmara CCD HR 600;
- . *spots* para a iluminação.

Especificações da Câmara Digital

- . Descrição
Câmara CCD de alta resolução HR-600, Branco/Preto
- . Número de elementos sensores
604(colunas) x 575(linhas)
- . Tamanho do elemento sensor
10 μ m x 15,6 μ m
- . Lentes
24mm

- . Padrão do sinal de vídeo

CCIR, 625 linhas, 50Hz

Especificações do Sistema de Processamento

- . Descrição

PC VISIONplus - *Frame Grabber*

ITEX PC plus (Biblioteca de subrotinas)

- . Tamanho do *Frame*⁽⁵⁾

512(colunas) x 480(linhas)

- . Frequência do conversor A/D⁽⁶⁾

10 MHz

Os equipamentos do Laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da FCT/UNESP utilizados, foram:

- . STECOMETER C (CARL ZEISS - JENA) - Estereocomparador de precisão. Permite observar coordenadas com emq $\leq 2 \mu\text{m}$;
- . COORDIMETER G (CARL ZEISS - JENA) - Equipamento utilizado para o registro eletrônico das informações. Faz a comunicação entre diversos equipamentos da linha ZEISS, entre eles o STECOMETER C e um microcomputador, por intermédio de uma interface serial;
- . Microcomputador PC/XT EGO, compatível com IBM PC.

(5) Esta configuração pode ser alterada, permitindo um quadro de até 1024 x 512 pixels.

(6) É função da configuração(512 pixels/linha --> f=10MHz)

5.3 Experimento I: Determinação do Fator de Escala

Através deste experimento procurou-se determinar o fator de escala horizontal. Com este propósito podem ser utilizadas diferentes técnicas, como por exemplo, a medição das frequências da câmara e do conversor A/D; a recuperação do fator de escala juntamente com outros parâmetros de calibração e a técnica apresentada por Tsai, descrita no capítulo anterior.

No presente trabalho optou-se pela determinação do fator de escala pela técnica de Tsai, pois através deste método não são necessários equipamentos para a medição das frequências. Além disso, o fator de escala pode ser determinado independentemente dos outros parâmetros de calibração.

5.3.1 Programas Desenvolvidos

Para a realização deste experimento, foi construído um programa em linguagem C, chamado RADIO, capaz de realizar as seguintes tarefas:

- . ler uma imagem armazenada no whinchester;
- . calcular a linha média(média de todas as colunas), e montar arquivo para ser utilizado na determinação do fator de escala por um outro programa e
- . calcular o tom de cinza médio da imagem e o desvio

padrão deste valor.

O valor do tom de cinza médio, determinado juntamente com o seu desvio padrão, é útil para verificar a homogeneidade da imagem. Uma outra aplicação implementada é a possibilidade de mostrar, de modo realçado, os pixels cujos tons de cinza são maiores (ou menores) do que a média, permitindo assim uma verificação da homogeneidade da iluminação. Se por exemplo, for colocada uma fonte de luz do lado direito da câmara, a face mais iluminada do alvo será o lado direito, mas dificilmente o operador terá acuidade visual para verificar este fato observando a imagem bruta. No entanto, se os pixels que apresentarem tons de cinza maiores (ou menores) forem realçados, a iluminação poderá ser eventualmente melhorada.

De posse do arquivo de dados resultante do programa RADIO, pode-se fazer o cálculo do fator de escala. Para tanto foi construído um programa em linguagem FORTRAN 77 chamado ESPECTRO. O programa ESPECTRO utiliza uma subrotina chamada FFT (de *Fast Fourier Transform*) para o cálculo da Transformada Discreta Fourier, onde o algoritmo de J. W. Cooley e J. W. Tukey é utilizado. A subrotina citada se encontra no ANEXO B.

O programa ESPECTRO lê um vetor de números complexos de dimensão 2^n , onde n é um inteiro. Esta condição é imposta pela subrotina utilizada e no caso, os valores de entrada são os tons de cinza da linha média. Como o vetor de entrada deve ser

complexo, o tom de cinza é lido como a parte real, sendo atribuído zero para a parte imaginária. O programa permite ao usuário aplicar ou não a função de ponderação e além disso, escolher o intervalo ($\max(FP) - \min(FP)$) a ser utilizado. Pode-se, ainda, escolher o número de pontos a serem utilizados na análise. Além do arquivo de entrada deve-se fornecer o número de elementos sensores da câmara e o número de pixels do *frame buffer*, pois estes valores são úteis no cálculo do fator de escala aproximado. Como resultado, o programa fornece um relatório de saída armazenado num arquivo chamado SX, e mais um arquivo chamado FFT que contém o domínio, a transformada de Fourier e o espectro de amplitude, juntamente com o tempo de processamento.

5.3.2 Coleta de Dados e Processamento

O alvo utilizado na realização do experimento deve ser homogêneo e opaco, para que não haja reflexões indesejáveis e a imagem seja a mais homogênea possível. Assim, foi utilizado para este experimento, um pedaço de folha de poliéster branco e opaco. Apesar da qualidade do alvo ser boa, e não causar reflexões prejudiciais deve-se tomar cuidado com a iluminação, de modo a deixar a fonte de luz a uma mesma distância dos extremos do alvo.

Uma vez que a fonte luminosa esteja posicionada corretamente, o próximo passo é a gravação da imagem. Para isso foi utilizado um *software* implementado no sistema

fotogramétrico digital da Universidade Federal do Paraná, denominado PCV e desenvolvido pelo Prof. Dr. - Ing. Ernst U. Fischer. Este programa foi desenvolvido em linguagem C e utiliza a biblioteca de subrotinas denominada ITEX PCplusTM. Quando a câmara CCR HR 600 é ligada e ativada, a imagem pode ser vista de modo *on line* pelo operador, bastando então, que sejam regulados a focalização, a abertura do diafragma e a iluminação. No momento em que o operador considerar que a imagem esteja adequada basta que seja dado o comando de gravação da imagem e, neste caso, o nome do arquivo é solicitado. A partir da imagem armazenada, a qualquer instante o usuário pode acessá-la.

Neste experimento foram utilizadas duas imagens, tomadas do mesmo alvo, as quais foram chamadas de IM01 e IM02.

5.3.3 Apresentação e Análise dos Resultados

Utilizando o programa RADIO calculou-se a média dos tons de cinza, bem como o seu desvio padrão. Além destes elementos foram montados os arquivos IM01.D e IM02.D que seriam posteriormente utilizados no cálculo do fator de escala horizontal.

A imagem IM01 possui como média dos tons de cinza o valor $\bar{g}_1 = 248,4$ e um desvio padrão de 6,38, enquanto que a imagem IM02 tem como valor médio, $\bar{g}_2 = 225,1$, com um desvio padrão de 10,56. A imagem IM01 é portanto, mais homogênea do

que a imagem IM02 e além disso, apesar do alvo ser o mesmo, ela se apresentou um pouco mais clara do que a segunda imagem, como pode ser visto pelo seu tom de cinza médio.

Posteriormente foi feito o cálculo do espectro de Fourier para as duas imagens. Os gráficos apresentando a variação dos tons de cinza para a linha média, bem como o espectro de amplitudes para a imagem IM01, são apresentados na Figura 5.1.

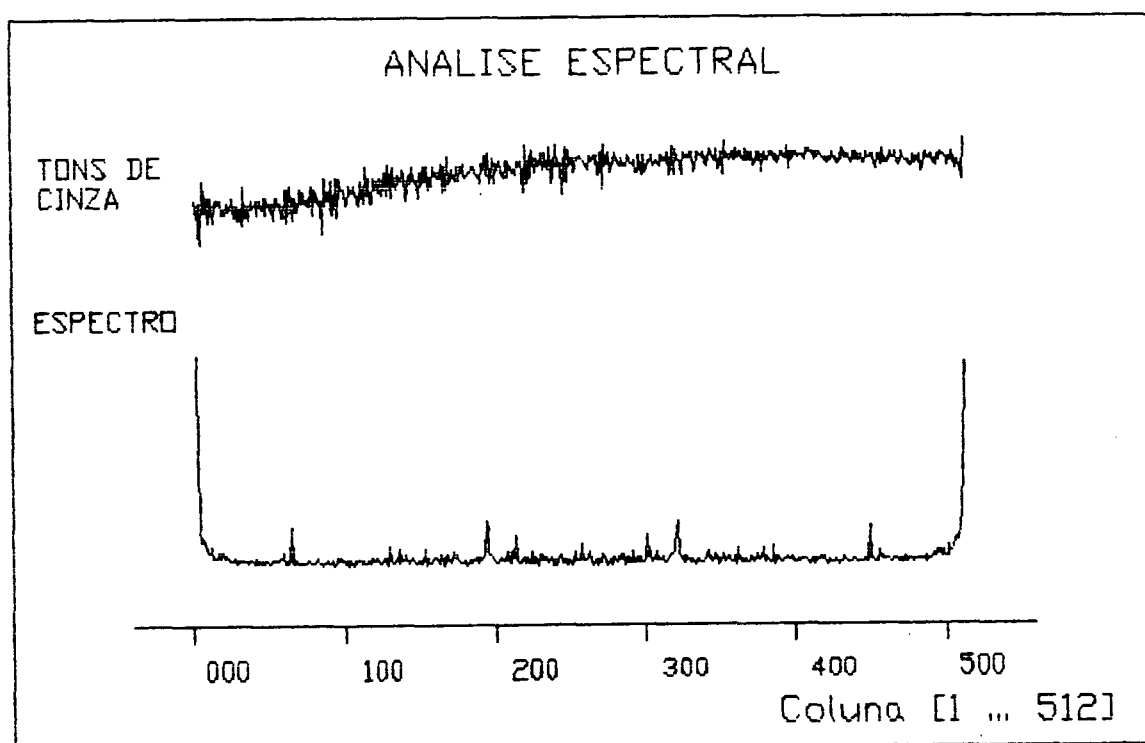


Fig. 5.1 - Linha média da imagem IM01 e o espectro correspondente (As ordenadas destes gráficos não estão em escala).

A Figura 5.2 mostra, em escala, a linha média da imagem IM01, bem como duas janelas distintas e ampliadas do mesmo sinal.

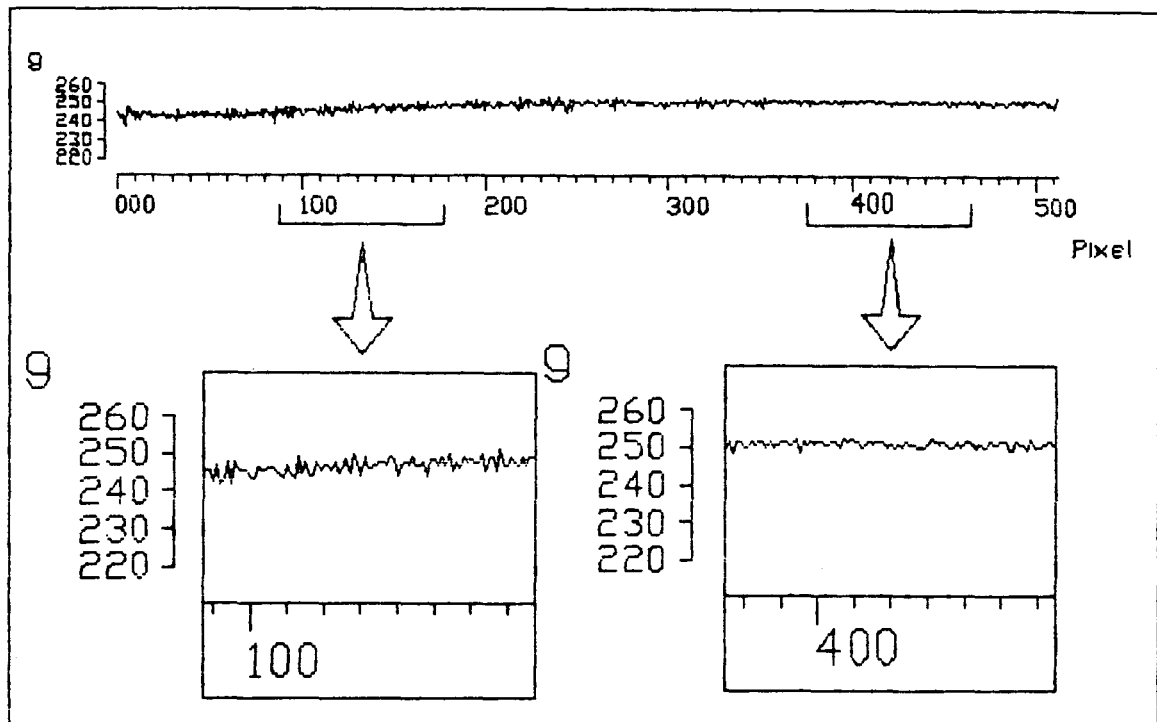


Fig. 5.2 - Tons de cinza da linha média da imagem IMO1.

Pode-se observar através das Figuras 5.1 e 5.2 que, apesar do alvo ser homogêneo a sua imagem não é. Isto se deve a presença de alguns ruídos. Além disso, pode-se observar a existência de picos alternados, dando a sensação de faixas verticais, como previsto por Lenz & Tsai. Estas faixas se devem às diferentes taxas de amostragem do sinal, como descrito anteriormente. Tais faixas podem ser melhor observadas através da Figura 5.3, que mostra uma fotografia da mesma imagem onde se vê com maior clareza, apesar dos reflexos e da qualidade da fotografia, o padrão vertical.

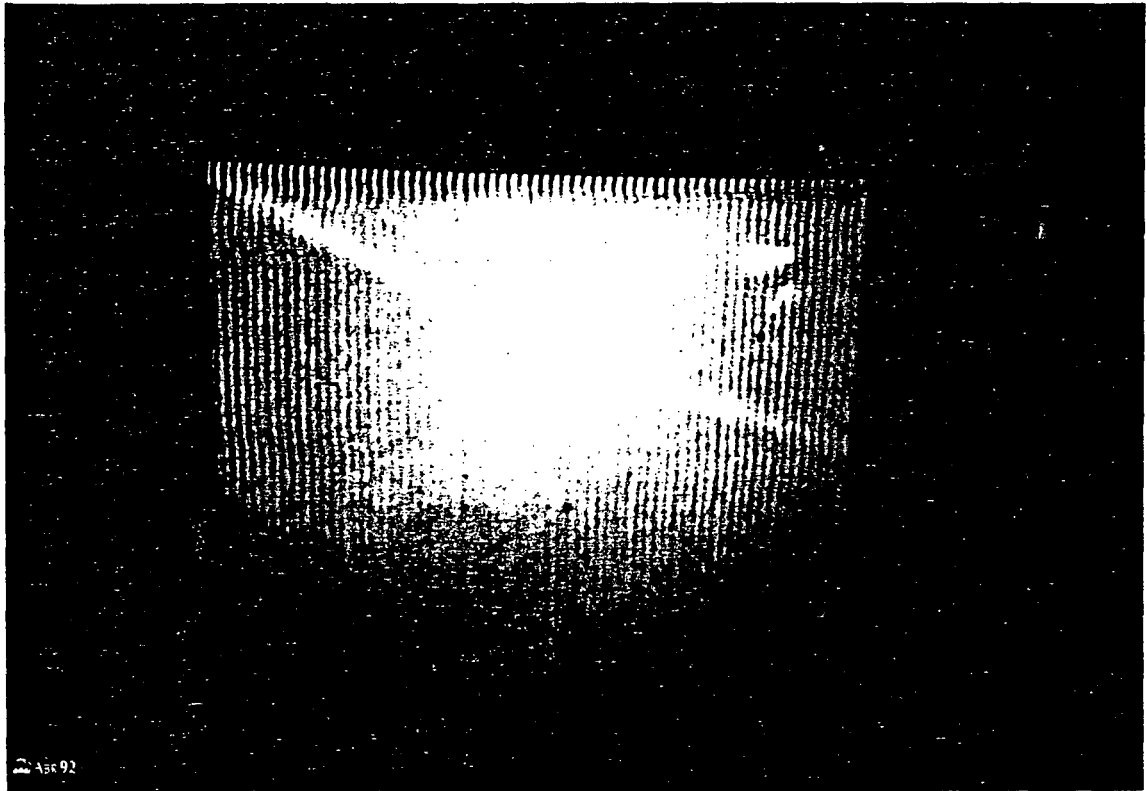


Fig. 5.3 - Faixas geradas pela interferência entre o *clock* do conversor A/D e da câmara HR 600 da UFPR. (Imagem ralçada)

Através da análise do espectro apresentado na figura 5.1 pode-se determinar a frequência espacial do padrão observado. Para isso, deve-se determinar o valor aproximado da frequência, como descrito no Capítulo 4, e procurar o pico mais próximo deste valor aproximado, a partir do número de elementos sensores/linha da câmara e do número de pixels/linha do *frame buffer*. A posição do pico procurado é 64 (sescenta e quatro), e corresponde ao número de ciclos numa determinada linha da imagem, que contém 512 pixels. Este valor expresso em períodos/pixel resulta em $64/512 = 0,125$ e corresponde a frequência espacial procurada, que aplicada na equação (4.16), determina o fator de escala. Um valor mais preciso para a

frequência e por consequência, para o fator de escala, pode ser calculado por (4.17).

Na sequência é apresentada a Figura 5.4 que mostra um detalhe do espectro das imagens IM01 e IM02.

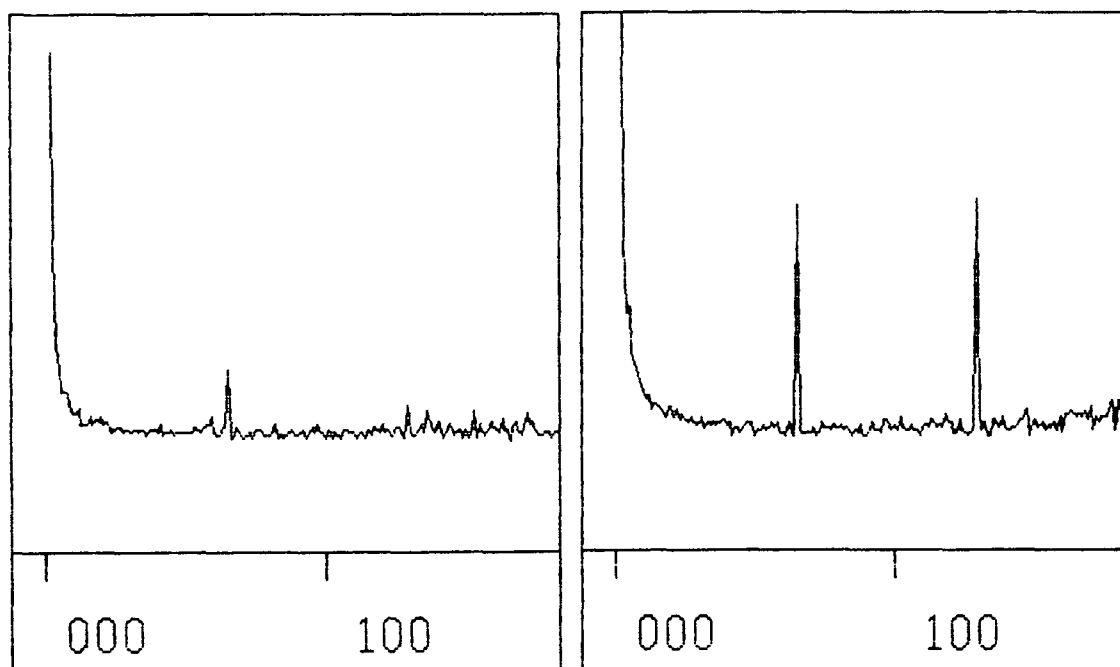


Fig. 5.4 - Detalhe do espectro das linhas médias para a imagem IM01 (esquerda) e IM02 (direita).

Observando o espectro das duas imagens pode-se notar que, apesar da imagem IM01 ser mais homogênea do que a imagem IM02, a posição do pico correspondente a frequência espacial (f_s) das faixas é a mesma. A diferença é que as amplitudes são maiores na imagem IM02.

Na Figura 5.5, a seguir, apresenta-se o espectro calculado sobre os 256 (duzentos e cinquenta e seis) pixels centrais, da linha média das duas imagens.

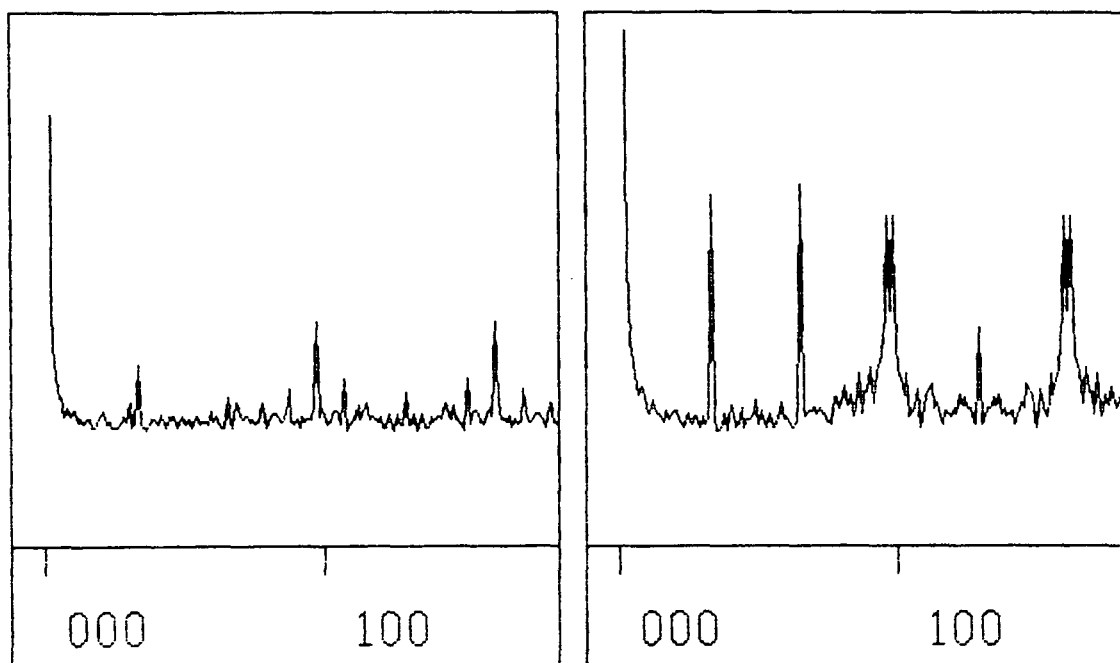


Fig. 5.5 - Detalhe do espectro das linhas médias para a imagem IM01 (esquerda) e IM02 (direita) utilizando 256 pixels.

Novamente aqui, observa-se que as amplitudes são maiores no espectro da imagem IM02. Nota-se, neste caso, que a posição dos picos alterou-se. Isto se deve ao fato de que, como o número de pixels utilizado passou a ser 256, o número de ciclos e a posição dos picos também sofreram alteração. A posição anterior do pico de interesse era 64, passando a ser 32, o que significa que o número de períodos do sinal é 32 para um total de 256 pixels. Isto corresponde a uma frequência espacial de $32/256=0,125$, igual aquela anteriormente determinada.

Os arquivos de saída SX correspondentes às análises das imagens IM01 e IM02, respectivamente, são mostrados na sequência:

CALIBRACAO DE CAMARAS - CCD
DETERMINACAO DO FATOR DE ESCALA HORIZONTAL

Imagem - IM01

Camara - CCD HR 600

Numero de elementos sensores - 604 H x 575 V

Sistema de Processamento - PCVISIONplus

Numero de pixels - 512 H x 480 V

Fatores de escala -

Sx(Pixel) = 1.179688

Sx(Fourier) = 1.124979

Diferenca entre os fatores de escala ! (%)

[Sx(Fourier) - Sx(Pixel)] / Sx(Fourier) = -4.9

Numero de elementos da amostra: 512

Numero de elementos utilizados na analise: 512

CALIBRACAO DE CAMARAS - CCD
DETERMINACAO DO FATOR DE ESCALA HORIZONTAL

Imagem - IM02

Camara - CCD HR 600

Numero de elementos sensores - 604 H x 575 V

Sistema de Processamento - PCVISIONplus

Numero de pixels - 512 H x 480 V

Fatores de escala -

Sx(Pixel) = 1.179688

Sx(Fourier) = 1.124965

Diferenca entre os fatores de escala ! (%)

[Sx(Fourier) - Sx(Pixel)] / Sx(Fourier) = -4.9

Numero de elementos da amostra: 512

Numero de elementos utilizados na analise: 512

Na Tabela 5.1, a seguir é apresentado um resumo dos testes realizados para a determinação dos fatores de escala.

TABELA 5.1 - Quadro comparativo dos fatores de escala determinados através de diferentes testes.

Imagem	Número de Pixels Utilizados	Sx (Fourier)	Sx (Pixel)	Discrepância relativa %
IM01	512	1,124979	1,179688	-4,9
IM01	512 com ponderacao*	1,124964	1,179688	-4,9
IM01	256	1,124830	1,179688	-4,9
IM02	512	1,124965	1,179688	-4,9
IM02	512 com ponderacao*	1,124963	1,179688	-4,9
IM02	256	1,124959	1,179688	-4,9

* Utilizando $j=2$ na equação (4.23).

Como pode-se observar, a diferença entre o fator de escala horizontal, calculado em função do número de pixels e pela FFT, ficou em torno de -4.9%. Experimentos realizados por Lenz e Tsai (Lenz & Tsai, 1986; Lenz & Tsai, 1988), indicaram discrepâncias em torno de 5% entre o fator de escala determinado pelo número de pixels e o valor determinado pela FFT. Comparando o fator de escala horizontal obtido pela FFT e o valor calculado a partir das frequências, os pesquisadores encontraram uma discrepância de apenas 10ppm, valor este que corresponde a 0,005 pixels num total de 512, o que é desprezível, considerando-se que um pixel tem dimensão da ordem de 10 a 15 μ m. Isto mostra que o valor obtido pela FFT é acurado.

A média dos valores apresentados na Tabela 5.1, resulta em 1,124943. A discrepância entre este valor e cada um dos valores da tabela é desprezível em termos práticos. Como a

imagem IM01 é mais homogênea, pode-se admitir que os valores resultantes para esta imagem são menos influenciados pela qualidade da imagem. Portanto pode-se utilizar como fator de escala horizontal a média dos valores obtidos pela imagem IM01, $S_x = 1,124924$.

5.4 Experimento II - Utilização da Transformação Projetiva no Plano

Este segundo experimento foi realizado com a finalidade de dar uma noção do erro esperado na determinação da posição planimétrica de pontos do espaço objeto, utilizando-se como modelo matemático a transformação projetiva no plano.

Este modelo foi escolhido em virtude da utilização de um campo de testes coplanar e, desprezando-se os ruídos da imagem e os erros sistemáticos, pode-se considerar que três pontos alinhados na imagem terão os seus homólogos no espaço objeto também alinhados, podendo-se utilizar a transformação projetiva no plano (2D) para relacionar estes dois espaços. Maiores detalhes sobre este modelo e sobre o procedimento de ajustamento pelo MMQ são expostos no ANEXO C.

5.4.1 Programas Desenvolvidos

Foram desenvolvidos e utilizados dois programas neste experimento. O primeiro, chamado POSICAO, tem a função de ler uma imagem em arquivo, mostrar na tela e permitir que o

usuário determine a posição (a nível de pixel) e o tom de cinza dos pontos escolhidos, mediante o posicionamento de um cursor. As posições e o tom de cinza são mostrados na tela ou armazenados em arquivo. O programa foi desenvolvido em linguagem C e utiliza subrotinas do ITEX PC plus e as subrotinas para criação e deslocamento do cursor foram desenvolvidas por Strauch (1991).

Um segundo programa desenvolvido e utilizado para este experimento chama-se 2D. Este programa faz transformações planas, como a ISOGONAL, AFIM e PROJETIVA. No caso, a transformação de interesse é a projetiva no plano, o qual utiliza um total de 8 parâmetros.

O programa 2D faz a leitura de dois arquivos. O primeiro contém as coordenadas dos pontos a serem utilizados para a determinação dos parâmetros (no sistema do espaço imagem e no espaço objeto) e as coordenadas dos pontos a serem transformados. Um segundo arquivo, com as coordenadas de todos os pontos no espaço objeto, é utilizado para a determinação das discrepâncias. No final é fornecido um relatório mostrando os parâmetros determinados, as coordenadas dos pontos nos dois espaços e as discrepâncias com relação aos pontos de apoio.

5.4.2 Coleta de Dados e Processamento

Para a execução deste experimento foram tomadas três imagens de um campo de teste coplanar. Foram distribuídos

vinte e cinco alvos, em forma de cruz, numa placa de cristal. Estes alvos foram distribuídos de forma aproximadamente regular, formando uma matriz de cinco linhas e cinco colunas. A placa de cristal foi colocada num estereocomparador de precisão - STECOMETER C, e os 25 pontos foram lidos. Para cada ponto foram feitas cinco séries de leitura, de modo a possibilitar uma estimativa da precisão das observações e, além disso, ter um certo controle durante a coleta dos dados, a fim de detectar eventuais erros grosseiros.

Foram determinadas as médias das coordenadas x e y para cada ponto, bem como o desvio padrão da média. O maior valor do desvio padrão da média para as coordenadas x e y foram respectivamente, $MAX(s_x) = 1,9 \mu m$ e $MAX(s_y) = 2,4 \mu m$. Apesar do valor $2,4 \mu m$ estar $0,4 \mu m$ além do que preconiza o fabricante, os desvios obtidos são perfeitamente aceitáveis.

As três imagens foram adquiridas e armazenadas pelo programa PCV, descrito anteriormente. Um croqui mostrando o posicionamento da câmara e do alvo, bem como, dando uma idéia das distâncias é apresentado na Figura 5.6. As imagens receberam os nomes de TE, TC e TD, os quais significam, respectivamente, Iomada a Esquerda, Iomada Central e Iomada a Direita.

Após adquirir as imagens, passou-se para a fase de medição das coordenadas, utilizando-se nesta coleta o programa POSICAO. Com a finalidade de verificar as discrepâncias

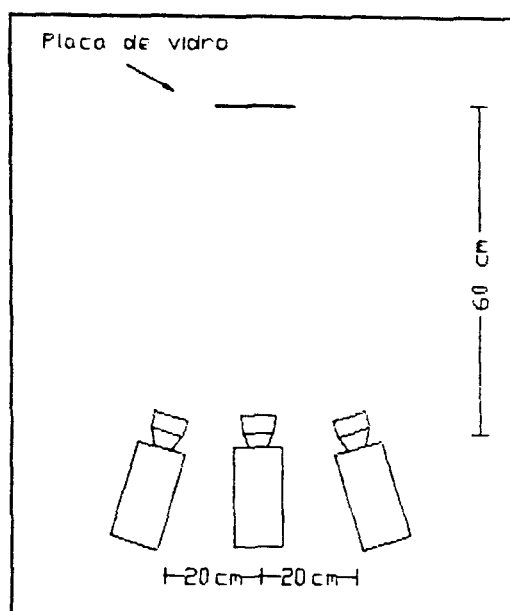


Fig. 5.6 - Posicionamento do alvo e da câmara durante a tomada das imagens.

ocorridas quando se faz a medição das coordenadas por correlação foi utilizado um programa desenvolvido recentemente na Universidade Federal do Paraná, por Strauch (1991), denominado COD (Comparador Digital).

O programa original, COD, sofreu pequenas alterações de modo a permitir ao usuário algumas variações durante as medições e com isso recebendo o nome de MONO3. Estes programas, COD e MONO3, fazem a determinação de regiões homólogas, a partir da definição de uma janela que funcione como alvo em uma das imagens (janela de referência) e de uma janela de pesquisa numa outra imagem (ou, inclusive na mesma imagem).

Estes programas utilizam a correlação como ferramenta matemática. Primeiramente faz-se uma correlação a nível de

pixel, utilizando uma função de correlação, e em seguida é realizado um refinamento utilizando o método dos mínimos quadrados. Maiores detalhes sobre o procedimento de correlação podem ser encontrados em Strauch (1991).

Portanto, além das observações feitas com o programa POSICAO, foram utilizadas observações feitas pelo programa MONO3.

5.4.3 Apresentação e Análise dos Resultados

As medições de coordenadas de imagem foram feitas e, juntamente com as coordenadas dos mesmos pontos no espaço objeto, foi montado um dos arquivos para ser utilizado no programa para a transformação projetiva no plano. Dos vinte e cinco pontos observados, cinco deles foram utilizados na determinação dos parâmetros de transformação entre os sistemas, o que permitiu 2 graus de liberdade na solução pelo MMQ. Os pontos escolhidos como referência foram os 4 pontos extremos da placa e o ponto mais central da mesma, fornecendo uma distribuição homogênea dos pontos.

As coordenadas destes cinco pontos foram utilizadas na determinação dos parâmetros da transformação projetiva. Na fase seguinte, as coordenadas de imagem dos vinte pontos restantes foram aplicadas na transformação inversa, possibilitando a obtenção das coordenadas destes pontos no espaço objeto. De posse das coordenadas calculadas pela

transformação projetiva e das coordenadas dos mesmos pontos, obtidas pelo STECOMETER C, pôde-se calcular as discrepâncias e fazer uma análise dos resultados.

Para diferenciar as grandezas obtidas a partir das observações feitas utilizando correlação, daquelas realizadas sem o uso de correlação, adotou-se um sub índice c ao se referir às primeira observações.

A Tabela 5.2 apresenta um resumo de alguns resultados obtidos no processamento anteriormente descrito, na qual são mostradas as discrepâncias médias em x e y e os desvios padrão⁽⁷⁾ para as discrepâncias, nos vinte pontos de checagem, nas duas direções.

TABELA 5.2 - Discrepâncias Médias em x e y e desvios padrão das discrepâncias.

Imagem	$\Delta\bar{x}(\text{mm})$	$\Delta\bar{y}(\text{mm})$	$s_{\Delta x}(\text{mm})$	$s_{\Delta y}(\text{mm})$
TEc	0,068	-0,039	0,1991	0,0711
TCc	0,131	-0,007	0,1606	0,0731
TDc	0,068	-0,032	0,1658	0,0542
TE	0,041	-0,050	0,1977	0,1400
TC	0,088	-0,013	0,1066	0,0695
TD	0,014	-0,206	0,1637	0,0991
Médias	0,068	-0,058		

$$(7) \quad s_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \Delta_{\text{medio}})^2}$$

A fim de avaliar se as discrepâncias médias mostradas na Tabela 5.2 apresentam ou não tendências, foi realizado um teste estatístico. Como o desvio padrão populacional é desconhecido foi realizado o teste da média, baseado na distribuição t de STUDENT.

O teste é feito com base nas seguintes hipóteses:

$$H_0: \Delta_{\text{media}} = 0 \quad \text{contra} \quad H_a: \Delta_{\text{media}} \neq 0, \quad (5.1)$$

ou seja, a hipótese nula considera que as discrepâncias médias são não-tendenciosas, enquanto que a hipótese alternativa supõe o oposto.

Para realizar o teste deve-se adotar inicialmente, o nível de significância α e calcular a estatística t através da seguinte expressão:

$$t_{\Delta} = \frac{\Delta_{\text{media}}}{s_{\Delta}} \cdot \sqrt{n} \quad (5.2)$$

onde:

. Δ_{media} é a discrepância média para x ou y;

$$\Delta_{\text{media}} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (5.2a)$$

. n é o número de elementos da amostra e

. s_{Δ} é o desvio padrão das discrepâncias.

Se o valor de t atender a condição $|t| > t_{n-1, \alpha/2}$, a hipótese

H_0 deve ser rejeitada.

Considerando $\alpha = 5\%$ e $n = 20$, que é número de pontos utilizado em cada teste, $t_{n-1, \alpha/2}$ assume o valor 2,09.

A Tabela 5.3 apresenta as estatísticas amostrais t para as discrepâncias médias, tanto em x quanto em y . Comparando os valores de t indicados na Tabela 5.3, com o intervalo $[-2,09; 2,09]$, conclui-se que, dos 12 testes realizados, a hipótese H_0 foi rejeitada em 5 deles ($\cong 41,7\%$). Nos testes restantes ($\cong 58,3\%$) a hipótese H_0 não pôde ser rejeitada.

Estes resultados revelam que, mesmo sem a modelagem dos erros sistemáticos que ocorrem durante a aquisição das observações com a câmara digital HR 600, a transformação projetiva no plano conduz a discrepâncias que podem estar livres de tendências. Obviamente, que os parâmetros da transformação projetiva no plano podem absorver parte dos

Tabela 5.3 - Tabela mostrando as estatísticas amostrais t para as discrepâncias médias em x e y .

Imagem	$t_{\Delta x}$	$t_{\Delta y}$
TE _c	1,52	-2,45 *
TC _c	3,65 *	-0,43
TD _c	1,83	-2,64 *
TE	0,93	-1,60
TC	3,69 *	-0,84
TD	0,38	-9,30 *

* H_0 rejeitada

erros sistemáticos, mas considerando que no modelo não existem parâmetros que modelem especificamente nenhum desses erros, os resultados apresentados mostram que, para algumas aplicações, não é necessário a utilização de uma modelo de calibração ou parametrização mais refinado.

Em outro teste estatístico faz-se uma comparação entre os resultados obtidos a partir de observações feitas com coordenadas a nível de pixel, com as coordenadas obtidas via correlação. Para tanto, foi feito um teste de igualdade de duas variâncias populacionais, sendo uma delas a variância das discrepâncias nas grandezas obtidas por correlação ($\sigma_{\Delta c}^2$) e a outra, a variância das discrepâncias nas grandezas obtidas sem correlação (σ_{Δ}^2). Neste caso o teste adequado é o teste F, no qual a hipótese básica é:

$$H_0: \sigma_{\Delta c}^2 = \sigma_{\Delta}^2 \quad \text{contra} \quad H_a: \sigma_{\Delta c}^2 \neq \sigma_{\Delta}^2 \quad (5.3)$$

A estatística amostral F é calculada por:

$$F = \frac{s_{\Delta c}^2}{s_{\Delta}^2} \quad (5.4)$$

As variâncias $s_{\Delta c}^2$ e s_{Δ}^2 podem ser calculadas a partir dos dados fornecidos na Tabela 5.2.

O teste é realizado verificando se o valor de F, obtido pela equação (5.4), está contido no intervalo $[F_{1-\alpha/2}, F_{\alpha/2}]$.

Caso $F < F_{1-\alpha/2}$ ou $F > F_{\alpha/2}$ deve-se rejeitar H_0 . Para $\alpha=5\%$ e amostras de 20 pontos, o intervalo é $[0,39 ; 2,53]$.

A tabela abaixo mostra os valores da estatística F para os testes realizados.

Tabela 5.4 - Valores da estatística F para os testes realizados.

Imagem	$s_{\Delta x}$ (mm)	F	$s_{\Delta y}$ (mm)	F
TE _c	0,1991	1,01	0,0711	0,26
TE	0,1977		0,1400	
TC _c	0,1606	2,26	0,0731	1,10
TC	0,1066		0,0695	
TD _c	0,1658	1,02	0,0542	0,29
TD	0,1637		0,0991	

* H_0 rejeitada

Dos seis testes realizados, em quatro deles a hipótese H_0 não pôde ser rejeitada. Isto indica que, em aproximadamente 66,7% dos testes realizados, as observações feitas utilizando correlação e medida a nível de pixel proporcionaram precisões equivalentes. Nos outros dois casos (33,3%), onde a hipótese H_0 foi rejeitada, os desvios padrão das discrepâncias obtidos pela correlação, foram menores que aqueles obtidos sem utilizar correlação, indicando que o uso de correlação forneceu um resultado mais preciso.

A Tabela 5.5, a seguir, apresenta o valor das discrepâncias máximas obtidas nas coordenadas x e y.

Tabela 5.5 - Discrepâncias máximas ocorridas em x e y.

Imagem	$ \Delta x _{\max} \text{ (mm)}$	$ \Delta y _{\max} \text{ (mm)}$
TE _c	0,391	0,158
TC _c	0,358	0,155
TD _c	0,358	0,129
TE	0,371	0,372
TC	0,236	0,154
TD	0,305	0,358
Médias	0,337	0,221

Os resultados fornecidos na Tabela 5.5 mostram que a máxima discrepância observada entre um ponto de checagem e o seu valor determinado pela transformação projetiva no plano, atingiu 0,391 mm no espaço objeto, ou algo da ordem de 1,6 pixels (no *frame buffer*). Isso indica que, para aquelas condições de tomada das imagens (distância de $\cong 60$ cm), o erro máximo numa coordenada não ultrapassa 0,4 mm. Isto corresponde a um erro resultante máximo da ordem de 0,57 mm (ou $\cong 0,6$ mm), mostrando que, para algumas aplicações, a transformação projetiva no plano pode ser utilizada, mesmo que os erros sistemáticos não sejam previamente parametrizados.

Considerando estes resultados pode-se escrever uma equação que relacione o erro tolerável com a distância máxima recomendada, sendo esta, de grande utilidade durante o planejamento para a tomada das imagens. Para o sistema fotogramétrico digital da UFPR com a Camara CCD HR 600 e os demais equipamentos esta equação seria:

$$D_{\max} \text{ (cm)} = E_{x,y} \text{ (mm)} \cdot 150 \quad (5.5)$$

onde,

. D_{\max} - distância entre a câmara e o alvo expressa em cm;

. $E_{x,y}$ - erro esperado nas coordenadas, expresso em mm e

.150 - constante determinada pela relação 60cm/0,4mm.

Utilizando o erro numa posição como elemento de entrada a equação (5.5) pode ser expressa por:

$$D_{\max} \text{ (cm)} = E_{\text{pos}} \text{ (mm)} \cdot 150 / \sqrt{2} \quad (5.6)$$

Não deve-se esquecer que as constantes das equações (5.5) e (5.6) foram calculadas em função da maior discrepância obtida, quando da utilização da transformação projetiva no plano.

5.5 Experimento III - Utilização da Transformação Linear Direta

Com este experimento pretende-se mostrar os erros que ocorrem na determinação de coordenadas de pontos do espaço objeto, quando se utiliza a DLT (Transformação Linear Direta).

5.5.1 Programa Desenvolvido

Para a execução do experimento foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN 77, denominado DLT, que realiza as seguintes tarefas:

- . leitura das coordenadas dos pontos de referência no espaço imagem;
- . leitura das coordenadas dos pontos de referência no espaço objeto;
- . determinação dos parâmetros da transformação linear direta, ou seja, dos elementos $[\begin{matrix} L_1 & L_2 & L_3 & \dots & L_9 \\ L_{10} & L_{11} & K_1' \end{matrix}]$;
- . leitura das coordenadas dos pontos de interesse no espaço imagem;
- . determinação das coordenadas planimétricas dos pontos no espaço objeto e
- . determinação das discrepâncias entre as coordenadas obtidas via DLT, com as coordenadas lidas no STECOMETER.

As coordenadas obtidas via DLT foram apenas X e Y, uma vez que o campo de teste utilizado era coplanar e as coordenadas Z, conhecidas. No anexo D é apresentado o procedimento de ajustamento pelo MMQ bem como a expressão para o cálculo das coordenadas X e Y.

5.5.2 Processamento e Análise dos Resultados

As observações utilizadas neste experimento foram as mesmas usadas anteriormente na transformação projetiva no plano, ou seja, aquelas feitas diretamente pelo operador, a nível de pixel, e as observações feitas por correlação.

Na transformação projetiva foram utilizados cinco pontos para a determinação dos oito parâmetros, ou seja, trabalhou-se com 2 graus de liberdade. Neste experimento utilizou-se sete pontos, o que proporciona, também, 2 graus de liberdade.

A Tabela 5.6, abaixo, mostra os resultados obtidos a partir do processamento realizado utilizando a DLT. As grandezas apresentadas são derivadas das discrepâncias calculadas sobre os dezoito pontos de checagem.

Tabela 5.6 - Discrepâncias médias em x e y ; desvios padrão das discrepâncias e estatística t para os testes realizados com a DLT.

Imagem	$\Delta\bar{x}$ (mm)	$\Delta\bar{y}$ (mm)	$s_{\Delta x}$ (mm)	$s_{\Delta y}$ (mm)	$t_{\Delta x}$	$t_{\Delta y}$
TE _c	0,019	0,023	0,2162	0,0597	0,37	1,67
TC _c	0,178	-0,042	0,1585	0,0795	4,77 *	-2,23 *
TD _c	0,004	-0,002	0,1699	0,0475	0,09	-0,17
TE	0,002	-0,057	0,2301	0,1386	0,04	-1,75
TC	0,069	-0,001	0,0951	0,0727	3,08 *	-0,13
TD	-0,034	-0,051	0,1713	0,0916	-0,85	-2,37 *
Médias	0,040	-0,022			* H ₀ rejeitada	

Considerando os dezoito pontos de cheque e um nível de confiança de 95%, o intervalo de confiança para a hipótese H_0 (5.1), ou seja $\Delta_{x,y} = 0$ (não existência de tendência), é dado por $[-2,11;2,11]$. Dos testes realizados, quatro deles ($\cong 33,3\%$) foram rejeitados, enquanto que com os oito restantes ($\cong 66,7\%$) isto não ocorreu. Contrapondo estes resultados com aqueles obtidos nos testes da transformação projetiva no plano (41,7% rejeitados e 58,3% não rejeitados), pode-se constatar que a DLT absorveu alguns erros que a transformação projetiva não conseguiu absorver.

A seguir é apresentada a Tabela 5.7, que mostra a discrepância máxima ocorrida em cada um dos testes realizados:

Tabela 5.7 - Discrepâncias máximas verificadas em em x e y , quando da utilização da DLT.

Imagem	$ \Delta x _{\max} \text{ (mm)}$	$ \Delta y _{\max} \text{ (mm)}$
TE _c	0,362	0,116
TC _c	0,409	0,214
TD _c	0,308	0,109
TE	0,366	0,383
TC	0,238	0,131
TD	0,351	0,175
Médias	0,339	0,188

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 5.7, pode-se observar que a discrepância máxima em x foi de 0,409 mm e em y foi de 0,383 mm. Isto indica que, ao tomar-se como referência o erro máximo, a DLT e a transformação projetiva no

plano são equivalentes. No entanto, quando se observa a média das discrepâncias máximas, percebe-se que, enquanto este valor é equivalente na direção x (0,339 mm contra 0,337 mm), na direção y a DLT mostrou-se um pouco melhor (0,188 mm contra 0,221 mm).

Outra observação que pode ser feita a partir da análise das Tabelas 5.2 e 5.6, é que a média das discrepâncias nos seis testes mostrou, que tanto em x quanto em y os resultados obtidos pela DLT foram melhores.

Quando se compara os resultados obtidos entre as direções x e y, observa-se que: para as discrepâncias médias, discrepâncias máximas, e para o desvio padrão, os resultados para a direção y são melhores, indicando que a precisão e a exatidão das observações é menor na direção x. Este fato pode ser causado, por exemplo, por problemas de amostragem do sinal e sincronização (Dähler, 1987; Beyer, 1987).

Além dessas causas, deve-se ainda considerar um efeito denominado *tailling* (Dähler, 1987), que faz com que, por exemplo, um alvo puntual apareça com uma pequena "cauda" na direção horizontal. Este efeito chega a ser visível para alguns alvos e nestes pontos a determinação de coordenadas por correlação pode ser bastante afetada, se não for feito algum tratamento na imagem, ou mesmo na vizinhança do alvo.

5.6 Experimento IV - Auto-Calibração

Os testes descritos até o presente momento foram realizados sobre um campo de testes coplanar. Isto se deve, principalmete, pela facilidade de materialização e também de medição de posições. Na proposta inicial de desenvolvimento deste trabalho previa-se, também, a realização de experimentos a partir de imagens tomadas de campos de testes 3D, porém, devido a ocorrência de percalços de ordem técnica, estas imagens não puderam ser feitas, comprometendo a realização de alguns experimentos que poderiam contribuir para o trabalho.

A utilização de campos de testes 3D contribui para a quebra de dependência linear da matriz normal, da mesma forma que a utilização de diferentes configurações e a tomada de imagens convergentes também contribui para minimizar este tipo de problema (Tommasselli, 1991).

Neste sentido propôs-se um experimento onde são utilizadas as três imagens simultaneamente, realizando-se a auto-calibração, ou seja, são determinados os parâmetros intrínsecos, extrínsecos e as coordenadas de pontos do espaço objeto, num único procedimento.

5.6.1 Programa Desenvolvido

Para a realização deste experimento foi desenvolvido um programa chamado CC (Calibração de Câmaras), escrito na

linguagem FORTRAN 77, que tem basicamente, a função de executar a calibração de câmaras. O modelo matemático utilizado baseia-se nas equações de colinearidade, acrescidas do modelo de erro apresentado no capítulo 4 e proposto originalmente por Moniwa (1972), o qual permite a parametrização dos seguintes elementos de calibração:

- . distância focal;
- . coordenadas do ponto principal;
- . parâmetros da distorção radial simétrica;
- . parâmetros da distorção descentrada e
- . parâmetros de afinidade.

Além destes elementos tem-se como parâmetros as coordenadas do CP (Centro Perspectivo) de cada imagem, os ângulos de orientação das câmaras no instante da tomada das imagens e as coordenadas (X,Y,Z) dos pontos, no espaço objeto.

O ajustamento pelo MMQ, utilizando o modelo apresentado, foi feito pelo método paramétrico onde as coordenadas de imagem são expressas explicitamente em função dos parâmetros.

O programa foi desenvolvido de modo a permitir que o usuário possa fazer a escolha dos parâmetros de calibração, o que o torna bastante versátil. Além desta opção, existe a possibilidade de fazer a determinação dos parâmetros para todo o conjunto de imagens utilizadas, ou variando-as uma a uma.

Para tanto, os parâmetros de calibração foram divididos em sete grupos:

- . Grupo 1 : f
- . Grupo 2 : $x_o \ y_o$
- . Grupo 3 : $K_1 \ K_2 \ K_3$
- . Grupo 4 : $P_1 \ P_2$
- . Grupo 5 : $A \ B$
- . Grupo 6 : $\kappa \ \Phi \ \Omega \ X_o \ Y_o \ Z_o$
- . Grupo 7 : $X \ Y \ X$

Esta divisão em grupos visa facilitar o dimensionamento das matrizes, a determinação da posição de cada parâmetro numa linha da matriz A e a sua posição na diagonal da matriz normal N . Para os parâmetros dos grupos 1 a 5 as opções oferecidas são as seguintes:

- . Opção para o grupo 1 (f):
 - 1. Não considerar.
 - 2. Bloco variante.
 - 3. Foto variante.

- . Opção para o grupo 2 ($x_o \ y_o$):
 - 1. Não considerar.
 - 2. Bloco variante.
 - 3. Foto variante.

. Opção para o grupo 3 (K_1 K_2 K_3):

- 1. Não considerar.
- 2. K_1 bloco variante.
- 3. K_1 e K_2 bloco variante.
- 4. K_1 , K_2 e K_3 bloco variante.
- 5. K_1 foto variante.
- 6. K_1 e K_2 foto variante.
- 7. K_1 , K_2 e K_3 foto variante.

. Opção para o grupo 4 (P_1 P_2):

- 1. Não considerar.
- 2. P_1 e P_2 bloco variante.
- 3. P_1 e P_2 foto variante.

. Opção para o grupo 5 (A B):

- 1. Não considerar.
- 2. A e B Bloco variante.
- 3. A e B Foto variante.

A escolha de opções pode ser feita via teclado, sendo que, para fazer esta opção e fornecer outros elementos ao programa, deve-se criar um arquivo denominado CC.OPT. Este é, portanto, um arquivo que contém alguns parâmetros de inicialização do programa CC, entre eles:

- . modo de entrada de informações, via teclado(*HAND*) ou arquivo(*FILE*);
- . opções para os parâmetros do grupo 1 ao 5, por

exemplo, 1 1 1 1 1;

- . nome do arquivo com as coordenadas dos pontos no espaço objeto, pontos incógnitos e pontos de injunção (as injunções são dadas em função do desvio padrão de cada coordenada);
- . nome do arquivo com as observações;
- . nome do arquivo com informações para o ajustamento, entre elas o limite de convergência, número máximo de iterações, parâmetros aproximados, injunções (posição, valor do parâmetro e desvio padrão);
- . nome do arquivo de saída e
- . indicador de fim de processamento (*STOP*).

No início deste tópico foi dito que a função básica do programa CC é a execução da calibração de câmaras. A expressão "função básica" foi utilizada pois, dependendo das opções que forem escolhidas, pode-se fazer simplesmente uma fototriangulação. Neste caso as opções devem ser 1,1,1,1 e 1. Se for utilizada apenas uma imagem ou foto e as opções forem: 1, 1, 1, 1 e 1 tem-se a resseção fotogramétrica.

A resolução do sistema de equações normais no programa CC é feita pelo método de Cholesky e utiliza uma subrotina desenvolvida por Hasegawa (Hasegawa *ett alii*, 1989), onde é explorada a simetria da matriz normal e a triangular superior é armazenada em um vetor, permitindo assim um aumento na velocidade de processamento, bem como uma economia de memória.

Considerando um ajustamento com p parâmetros, a matriz N tem dimensão $p \times p$, que é o número de posições de memória utilizada para armazenar a matriz N . Com a exploração da simetria, a economia de memória é de $50(p - 1)/p$, em percentagens. Para um sistema de dimensão 10×10 a economia de memória é de 45% (45 posições), enquanto que para um sistema de dimensão 100×100 a economia é de 49,5% (4950 posições). A exploração da simetria é, portanto, uma importante otimização principalmente quando se faz o processamento em microcomputadores.

5.6.2 Coleta de Dados e Processamento

Em função de não se ter coletado imagens de campo de testes 3D para a realização da auto-calibração, foram realizados testes com as imagens anteriormente coletadas e com as mesmas observações.

No modelo matemático básico, equações de colinearidade, as unidades utilizadas para as coordenadas no sistema do espaço imagem podem ser expressas tanto em pixel quanto em mm. Caso sejam utilizadas as coordenadas na sua forma bruta, os parâmetros terão como unidade o pixel, o que muitas vezes pode não ser interessante, pois o valor aproximado de f teria de ser calculado na unidade pixel. Um cuidado a ser tomado quando se utiliza coordenadas na sua forma bruta é que, como o ponto principal se situa próximo ao centro do *frame*, é interessante que se faça a translação do sistema para o centro do quadro, de modo que a posição do Ponto Principal seja calculada em

relação ao centro do *frame*. Deve-se lembrar também de fazer uma reflexão no eixo y , de modo a torná-lo dextrógiro, caso o sistema do espaço objeto também o seja.

Para evitar o inconveniente de trabalhar com a unidade pixel pode-se, após a translação para o centro e a reflexão do eixo y , multiplicar o valor resultante pela dimensão do pixel em milímetros. Deste modo, a escala estará próxima da real e um eventual erro remanescente na escala pode ser absorvido pela distância focal e pelos parâmetros A e B .

Definida a escala (milímetros) passou-se para a calibração da câmara, mas antes de se fazer o processamento das três imagens simultaneamente optou-se por processá-las isoladamente, apenas para se ter os valores aproximados mais próximo do real. Para tanto foram determinados os seguintes parâmetros: $f, x_0, y_0, K_1, A, B, X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp}, \kappa, \phi$ e ω , para cada uma das imagens. Também foram considerados como parâmetros, as coordenadas no espaço objeto de apenas sete pontos, e uma vez que estes pontos tem suas coordenadas conhecidas com precisão, foram aplicadas injunções nos mesmos.

Além dessas injunções, foram aplicadas injunções em f, X_{cp}, Y_{cp} e Z_{cp} a fim de quebrar a correlação de parâmetros e permitir que o sistema pudesse ser resolvido. Para f utilizou-se o valor nominal com um desvio de 10mm e para a posição da câmara foram feitas medidas com trena e atribuídos desvios da ordem de 50mm. Como a qualidade das observações são

diferentes nas direções x e y, os pesos para as observações foram diferentes nas duas direções. Foi atribuído desvio padrão da ordem de $20\mu\text{m}$ para y e $30\mu\text{m}$ para x.

Uma vez que está se usando um conjunto de pontos coplanares, a geometria se torna mais crítica, devido às dimensões do sensor. Considerando que a distância focal nominal é de 24 mm e que a matriz de sensores tem um tamanho da ordem de $6\text{mm} \times 4,5\text{mm}$, a intersecção dos raios se dá em condições geometricamente não muito favoráveis, pois o ângulo de abertura máximo nas direções x e y assumem aproximadamente, $14^{\circ}30'$ e $10^{\circ}45'$, respectivamente.

Realizadas as calibrações com as três imagens separadamente, passou-se para a auto-calibração utilizando as três imagens simultaneamente, onde os parâmetros previamente determinados foram utilizados como parâmetros aproximados para o processamento simultâneo.

5.6.3 Apresentação e Análise dos Resultados

A auto-calibração das três imagens simultaneamente foi realizada, utilizando-se dois grupos de parâmetros de calibração diferentes.

Os parâmetros utilizados nos dois grupos foram:

. Grupo I : $f \ x_o \ y_o \ K_1 \ K_2 \ K_3 \ P_1 \ P_2 \ A \ B$

. Grupo II : $f \ x_o \ y_o \ K_1 \ A \ B$

Como resultado dos dois ajustamentos foram determinados os parâmetros e as coordenadas dos 25 pontos no espaço objeto. Dos 25 pontos, sete foram utilizados como apoio e os restantes (18) como incógnitos. Como todos os 25 pontos são coplanares, foram dadas injunções na coordenada Z de todos eles. Posteriormente, foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas obtidas da auto-calibração e as coordenadas lidas no STECOMETER. Na Tabela 5.7 é apresentado um resumo dos resultados obtidos:

Tabela 5.8 - Discrepâncias médias em x e y , desvios padrão das discrepâncias e discrepâncias máximas, para o resultado da auto-calibração.

Grupo →	Grupo I	Grupo II
$\bar{\Delta x} \text{ (mm)}$	0,107	0,067
$\bar{\Delta y} \text{ (mm)}$	0,027	-0,014
$s_{\Delta x} \text{ (mm)}$	0,1507	0,1199
$s_{\Delta y} \text{ (mm)}$	0,0863	0,0499
$\Delta x_{\max} \text{ (mm)}$	0,431	0,269
$\Delta y_{\max} \text{ (mm)}$	0,205	0,126

Grupo I : $f \ x_o \ y_o \ K_1 \ K_2 \ K_3 \ P_1 \ P_2 \ A \ B$

Grupo II : $f \ x_o \ y_o \ K_1 \ A \ B$

Usando o teste t para verificar se as discrepâncias médias são ou não tendenciosas, verifica-se que, para os testes com os dados dos dois grupos, existe uma pequena tendência na direção x . Observando as discrepâncias máximas

para os resultados dos grupos I e II, tem-se que a discrepância resultante máxima, calculada a partir de Δx_{\max} e Δy_{\max} , atinge 0,477 mm para o grupo I e 0,297 mm para o grupo II.

Estes resultados mostram que, dos dois grupos testados, aquele que parametriza os elementos f , x_0 , y_0 , K_1 , A e B forneceu os melhores resultados. O que indica que a inclusão dos parâmetros K_2 , K_3 , P_1 e P_3 não contribuíram para a melhoria da solução.

Para ilustrar este resultado, a Figura 5.7 mostra as discrepâncias obtidas a partir da imagem TE, para o caso da utilização da transformação projetiva, e ainda as discrepâncias obtidas após a realização da auto-calibração.

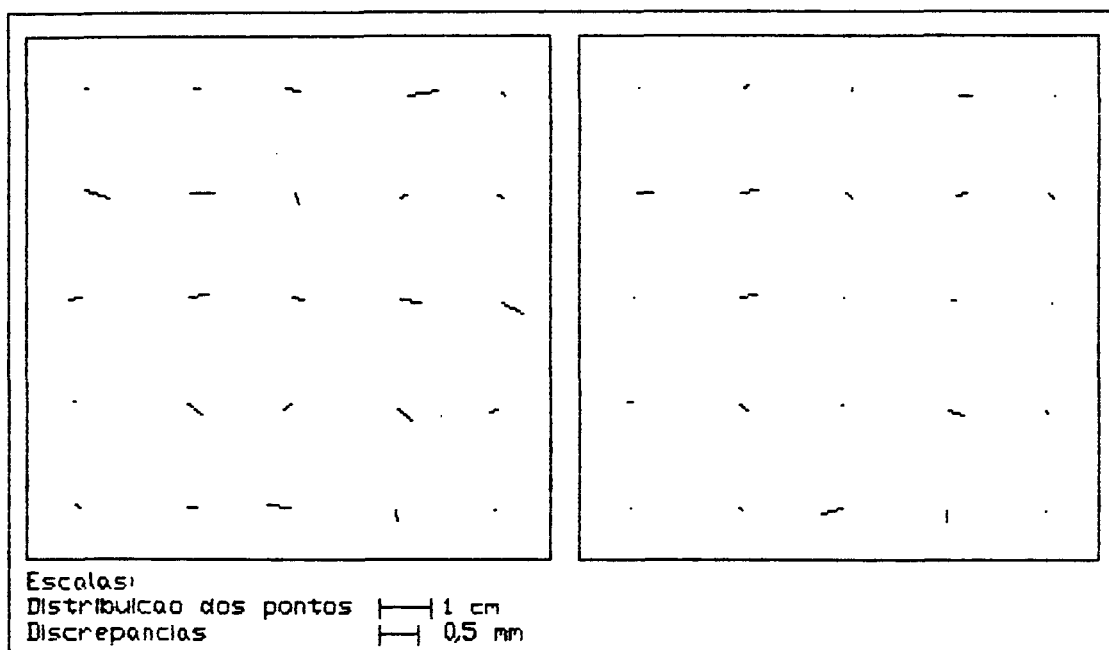


Fig. 5.7 - Discrepâncias nos pontos do espaço objeto. A esquerda - após transformação projetiva no plano (Imagem TE) e a direita - após a auto-calibração.

A equação (5.6), dada por $D_{\max}^{(cm)} = E_{\text{pos}}^{(mm)} \cdot 150/\sqrt{2}$, fornece, aproximadamente, a distância recomendada a fim de que se obtenha um erro máximo de E_{pos} , quando da utilização da transformação projetiva no plano, conforme procedimento realizado anteriormente. Pode-se escrever uma equação semelhante, em função dos resultados obtidos na auto-calibração:

$$D_{\max}^{(cm)} = E_{\text{pos}}^{(mm)} \cdot 202 \quad (5.7)$$

A constante 202 é o valor aproximado resultante da relação $60/0,297$. Cabe ressaltar aqui que as expressões (5.5), (5.6) e (5.7) são válidas para o sistema utilizado e para testes e experimentos realizados com as mesmas técnicas e em condições semelhantes.

Uma outra observação importante é que as expressões (5.5), (5.6) e (5.7) foram escritas em função do erro máximo observado, o que dá uma grande margem de segurança em relação ao erro tolerável.

Se for calculada a discrepância resultante para cada um dos 18 pontos de cheque, chega-se a um valor médio $\Delta \bar{r} = 0,124\text{mm} \pm 0,0178\text{mm}$. Considerando um nível de confiança de 95%, e 17 graus de liberdade pode-se escrever:

$$P(0,085 < \Delta \bar{r} < 0,163) = 95\%$$

O que significa que, com uma probabilidade de 95%, a discrepância média resultante está no intervalo [0,085 mm e 0,163 mm]. Adotando o valor superior deste intervalo como referência, pode-se reescrever:

$$D_{\max} \text{ (cm)} = \bar{E}_{\text{pos}} \text{ (mm)} \cdot 368 \quad (5.8)$$

onde:

- . \bar{E}_{pos} - representa o erro médio esperado numa posição.
- . $368 \cong 60/0,163$.

5.7 Proposta de Aplicação

Em função de resultados obtidos, das possibilidades de aquisição de imagens e de processamento com grande velocidade, a utilização das câmaras digitais vem crescendo, e com isso, aplicações nas mais diferentes áreas estão sendo pesquisadas. A utilização de câmaras digitais ainda é mais restrita a aplicações a curta distância, uma vez que alguns fatores, como por exemplo, o tamanho dos elementos sensores, a dimensão da matriz de sensores e outros, afetam a qualidade das medidas.

Dentre as áreas de aplicação mais desenvolvidas pode-se destacar:

- . Medicina

- Bioestereometria, destinado ao acompanhamento dos

pacientes para a análise da evolução / regressão das enfermidades, diagnóstico.

. Indústria

- Controle de qualidade de peças nas mais diferentes modalidades de indústrias.
- Controle de estruturas, como por exemplo; inspeção de dutos em plataformas petrolíferas.
- Determinação de superfícies: determinação de pontos planialtimétricos para modelagem de sólidos e modelos, por exemplo, na indústria automobilística.
- Robótica: posicionamento e orientação de robôs.

. Mapeamento

- Digitalização de imagens para produção de ortofoto digital.
- Digitalização de produtos cartográficos para integração em bancos de dados com estrutura *raster*.

5.7.1 Princípio do Sistema Aplicado ao Controle de Qualidade

Neste tópico preocupou-se em apresentar um sistema para ser aplicado ao controle de qualidade, utilizando-se de técnicas fotogramétricas e imagens obtidas por câmaras digitais. Tal sistema possibilitaria, por exemplo, a medição e controle de qualidade de peças numa linha de produção.

Em princípio, pode-se imaginar uma linha de produção que produza uma determinada peça P, e que o fabricante deseje fazer o controle de qualidade de todas as peças produzidas, ou de amostras destas peças. Naturalmente, a peça só passa pelo controle de qualidade se ela atender a um padrão pré-determinado. Este padrão pode estar relacionado com um valor mínimo, ou máximo, ou até mesmo um intervalo de aceitação para algumas das grandezas abaixo:

- . largura;
- . comprimento;
- . área;
- . perímetro;
- . diâmetro ou raio;
- . espessura, etc.

Considerando que o sistema fotogramétrico digital propicia a precisão necessária para o controle de qualidade, pode-se utilizá-lo como ferramenta para tal procedimento. Através de um planejamento prévio, deve-se calcular, por exemplo, a distância na qual a(s) câmara(s) deve(m) ser colocada(s), a fim de atingir a precisão prescrita.

Assumindo que o controle de qualidade seja feito por técnicas fotogramétricas é necessário que se tenha a disposição alguns pontos, cujas posições sejam conhecidas, podendo-se assim aplicar injunções de modo a definir o sistema de referência. É lógico que podem ser aplicados diferentes

tipos de injunções, como por exemplo, injunções de distância, etc. A disposição dos pontos e os tipos de informações de referência varia conforme o ambiente de trabalho. No presente caso sugere-se uma superfície que sirva de suporte para as peças. Esta superfície pode ser uma placa de cristal contendo um conjunto de alvos (2D e 3D) cujas posições são conhecidas com grande precisão (pontos de apoio). Nesta superfície podem ser fixados alguns suportes de modo que as peças sejam colocadas, preferencialmente, sobre uma mesma região da superfície. A Figura 5.8 mostra um esquema de como poderia ser concebida a superfície para colocação das peças.

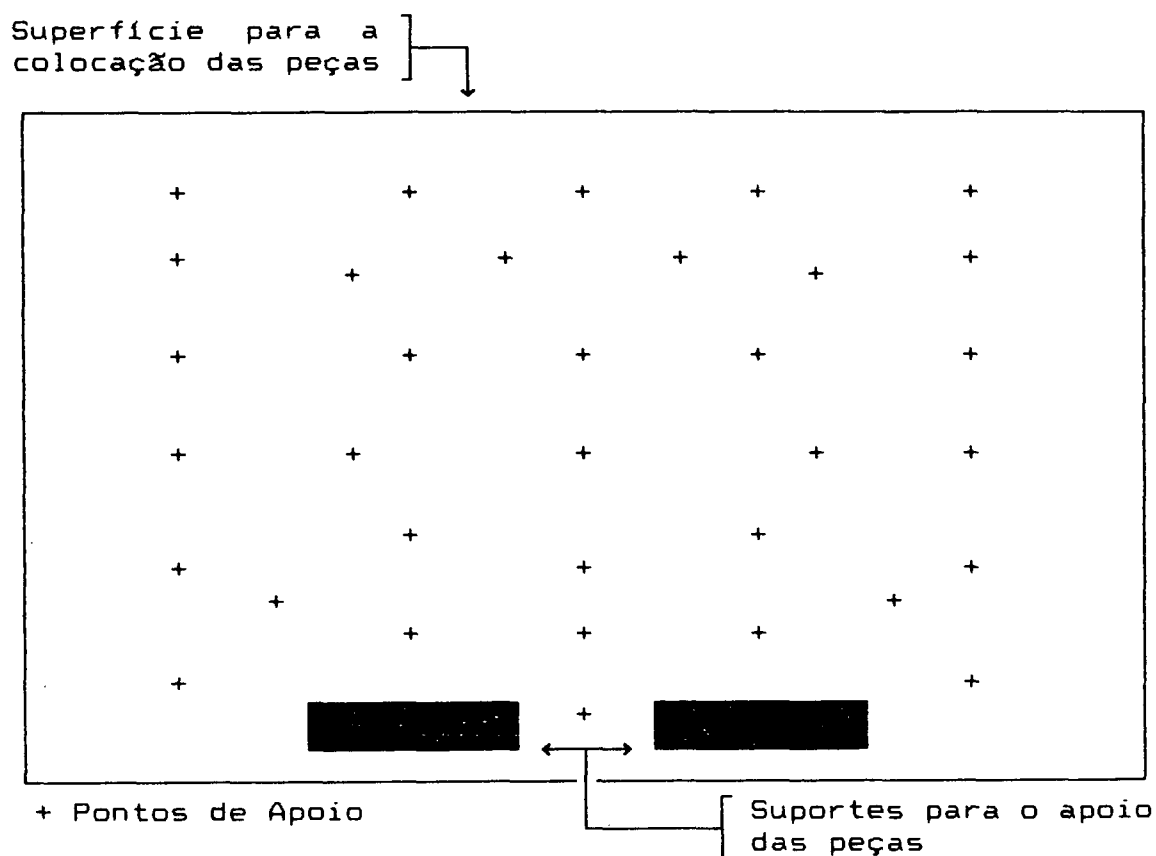


Fig. 5.8 - Concepção de uma superfície para o apoio das peças.

Na Figura 5.9 é apresentado um fluxograma ilustrando a

seqüência de procedimentos para a execução do controle de qualidade, utilizando a auto-calibração.

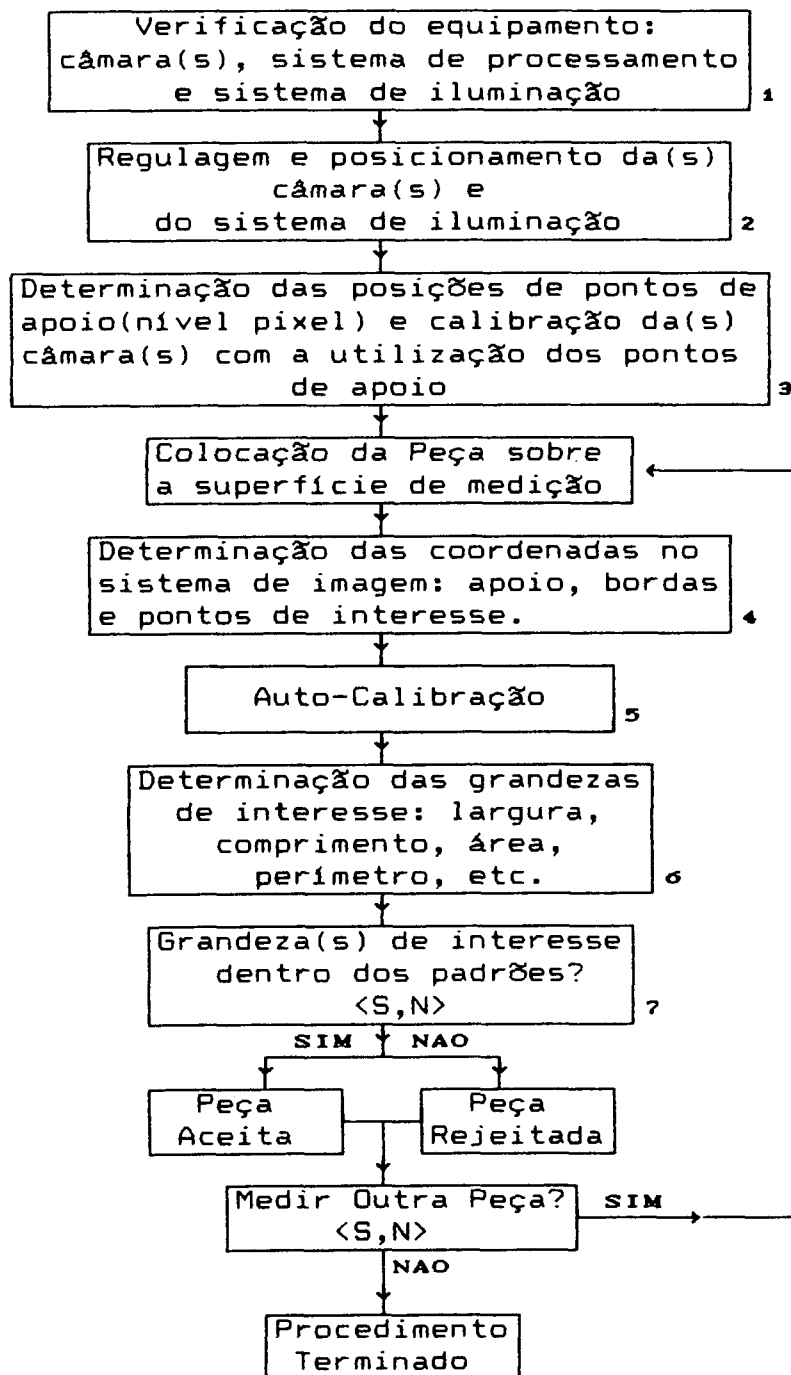


Fig. 5.9 - Fluxograma mostrando o procedimento de controle de qualidade de peças, utilizando a auto-calibração.

Na sequência cada uma das fases do fluxograma mostrado na figura 5.9 são explicadas:

- . 1 - Primeiramente, deve ser feita uma verificação geral do equipamento e das diversas conexões, a fim de assegurar que não ocorram interrupções durante o procedimento de controle de qualidade.
- . 2 - A(s) câmara(s) deve(m) ser posicionada(s) e a distância câmara(s)/alvo deve ser ajustada de modo que a precisão final seja atingida. Deve-se também testar a posição da fonte de iluminação a fim de se obter a melhor qualidade da imagem e, além disso, regular a abertura do diafragma e a focalização.
- . 3 - Medir a posição dos pontos de apoio no sistema de imagem, a nível de pixel, e selecionar alguns deles para fazer a calibração da(s) câmara(s) utilizada(s). Como resultado deste procedimento são determinadas, além de alguns parâmetros de calibração, a posição e orientação da câmara no instante da tomada da imagem, de maneira a facilitar o procedimento de auto-calibração. As posições aproximadas dos pontos de apoio determinadas nesta fase servirão para que, no momento em que a peça seja colocada no suporte, as coordenadas dos pontos selecionados sejam

medidas automaticamente.

. 4 - Uma vez que a peça a ser verificada esteja disponível, passa-se para a medição refinada de alguns pontos:

.. Pontos de Apoio - os pontos de apoio podem ser medidos por correlação ou através de outro procedimento qualquer. Como as coordenadas aproximadas destes pontos são conhecidas da fase 3, não é necessário que o operador indique a sua posição por meio de um cursor. Neste caso as medidas desses pontos passam a ser feitas automaticamente.

.. Pontos da Peça - Além dos pontos de apoio deve-se medir alguns pontos a fim de que certas grandezas sejam calculadas. Para a medição de pontos da peça é necessário que se conheça os limites da peça, podendo-se utilizar diferentes métodos para a detecção de bordas. No método proposto há necessidade de que seja definida a posição aproximada da borda na imagem. Esta posição pode ser definida de duas maneiras: a primeira seria definir estes pontos na fase 3 (a nível de pixel) e a segunda seria calcular a posição aproximada destes pontos em função da geometria da peça.

.. Pontos de *check* - pontos de apoio que não

participação do ajustamento mas que podem ser usados para um controle de qualidade do procedimento fotogramétrico.

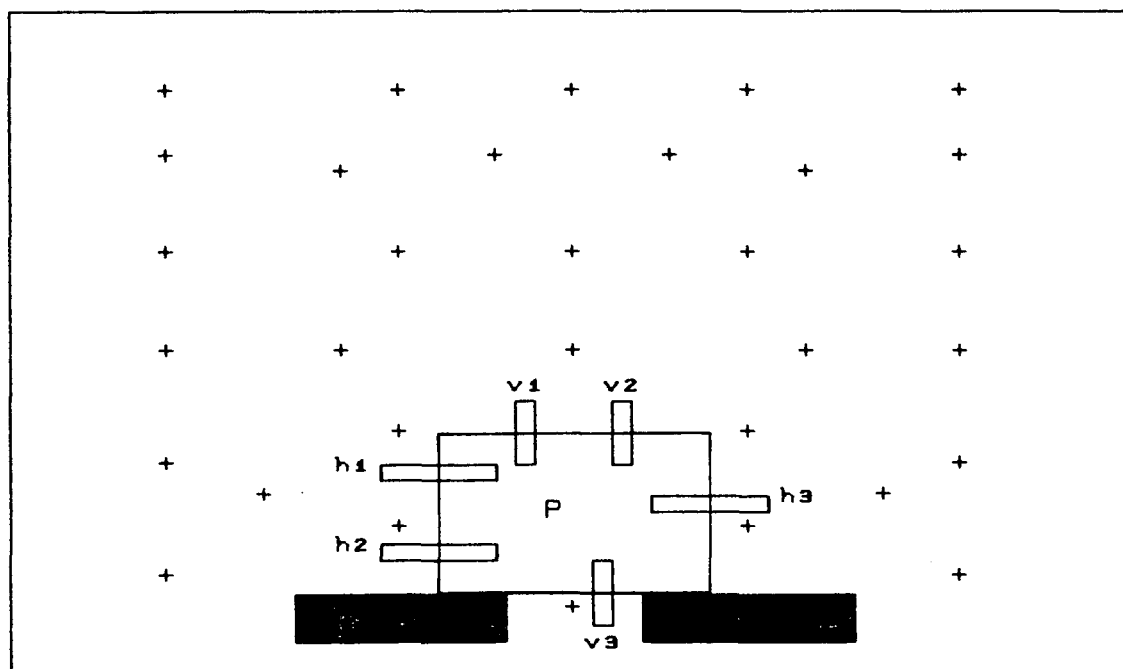
- . 5 - A partir das observações realizadas na fase 4 e dos parâmetros aproximados determinados na fase 3, pode-se realizar a auto-calibração, determinando-se (de modo rigoroso), além dos parâmetros de calibração, os elementos de orientação da(s) câmara(s) e coordenadas de alguns pontos da peça. Pode-se utilizar, ainda, alguns pontos de apoio como *check points*.
- . 6 - Nesta fase são determinadas as grandezas que serão utilizadas para o controle da peça, como por exemplo, a largura e o comprimento. A(s) grandeza(s) utilizada(s), bem como as especificações para o controle da qualidade, são definidas pelo fabricante. Esta fase é específica para cada tipo de produto a ser testado.
- . 7 - Após a determinação das grandezas de interesse, deve-se compará-las com o padrão adotado. Se os padrões forem atendidos a peça é aceita, caso contrário, rejeitada. Concluída esta fase, o sistema pergunta se tem outra peça a ser medida, e caso a resposta seja afirmativa, o procedimento continua a partir da fase 4. Caso não exista

outra peça a ser medida, o procedimento é finalizado.

Analisando o fluxo anterior observa-se que a fase 4, na qual está prevista uma operação de detecção de bordas, exige-se alguns cuidados que não foram discutidos, por se tratar de um tema muito amplo e que foge dos objetivos iniciais. Todavia, considerou-se interessante discutir uma solução para o caso de uma peça P retangular.

Assim, na Figura 5.10 é mostrada a peça P sobre a superfície de medição.

Superfície para a
colocação das peças } ↓



+ Pontos de Apoio

h_i - vetor de pixel's horizontal - define o ponto P_{hi}
 v_i - vetor de pixel's vertical - define o ponto P_{vi}

Fig. 5.10 - Superfície de suporte com um peça.

A sugestão apresentada é baseada na leitura de vetores (de tons de cinza) na direção perpendicular às bordas. A posição aproximada de cada vetor é fornecida por uma das duas maneiras propostas na fase 4. O tamanho dos vetores pode ser o mesmo e deve ser suficiente para garantir que a borda desejada esteja contida no mesmo.

Para o caso de peças retangulares é interessante armazenar seis vetores (ver Figura 5.10), que permite definir seis pontos.

De posse dos vetores h_1 , h_2 , h_3 , v_1 , v_2 e v_3 , pode-se localizar a borda dentro de cada um deles, através da análise do perfil radiométrico. A Figura 5.11, ilustra este princípio. Plotando-se o perfil radiométrico de um dos vetores, por exemplo do vetor h_1 (mostrado na parte superior da Figura 5.11), deseja-se localizar o ponto (pixel) cuja posição é a mesma do ponto de inflexão deste perfil. Para determinar este ponto de inflexão, pode-se calcular o gradiente para cada ponto do vetor e pesquisar qual é o pixel que corresponde ao máximo deste gradiente (ou mínimo, dependendo da concavidade da curva).

Para obter uma localização a nível do sub-pixel pode-se ajustar uma parábola a alguns pontos (mínimo de 3) da função gradiente, em torno do ponto de máximo (ou mínimo). O ponto de máximo (ou mínimo) desta parábola determina a posição da borda.

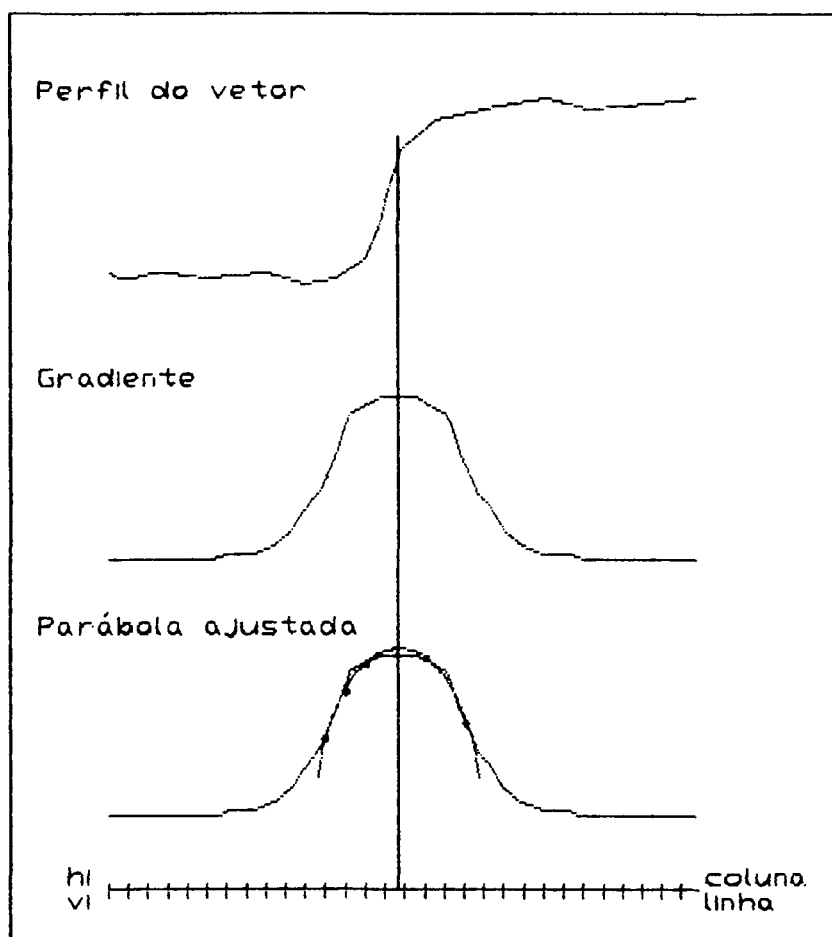


Fig. 5.11 - Princípio da Detecção das Bordas.

Ao termino deste procedimento tem-se as coordenadas dos 6 pontos P_{h1} , P_{h2} , P_{h3} , P_{v1} , P_{v2} e P_{v3} que foram definidos pelas bordas $h1$, $h2$, $h3$, $v1$, $v2$ e $v3$, respectivamente. A distância entre o ponto P_{h3} até a reta definida pelos pontos P_{h1} e P_{h2} fornece uma dimensão (largura ou comprimento) da peça, um cálculo análogo, usando P_{v1} , P_{v2} e P_{v3} , permite determinar a outra dimensão da mesma. A determinação das dimensões da maneira acima evita erros causados pela inclinação da peça sobre a superfície.

Este procedimento é simples mas deve-se tomar certos cuidados como por exemplo com a iluminação, evitando assim que sombras prejudique a detecção correta das bordas, além disso, uma exigência importante é que a cor da peça e a cor da superfície de fundo sejam contrastantes, a fim de que a borda seja melhor definida.

O fluxograma apresentado na Figura 5.9 mostra o procedimento para o controle de qualidade por auto-calibração. No caso da utilização de uma transformação T qualquer, o fluxo de atividades deverá apresentar algumas modificações, conforme mostra a Figura 5.12 e como descrito na sequência:

- . Na fase 3, por exemplo não seria necessário fazer a calibração prévia da câmara. Deve-se medir as coordenadas aproximadas dos pontos de apoio (e eventualmente a posição de algumas bordas e pontos de *check*).
- . Na fase 4 seriam medidas as coordenadas imagens (rigorosas) dos pontos de apoio, automaticamente, e então feita a determinação dos parâmetros da transformação T utilizada.
- . Na fase 5 seria feita a detecção de bordas e a medição de alguns pontos de interesse.
- . Na fase 6, as coordenadas dos pontos da fase anterior

seriam transformadas para o espaço objeto, utilizando a transformação inversa (T^{-1}).

- . Na fase 7 seria feita a determinação das grandezas de interesse.
- . Finalmente na fase 8, as grandezas de interesse seriam comparadas a um padrão adotado e em função do resultado, a peça seria aceita ou rejeitada.

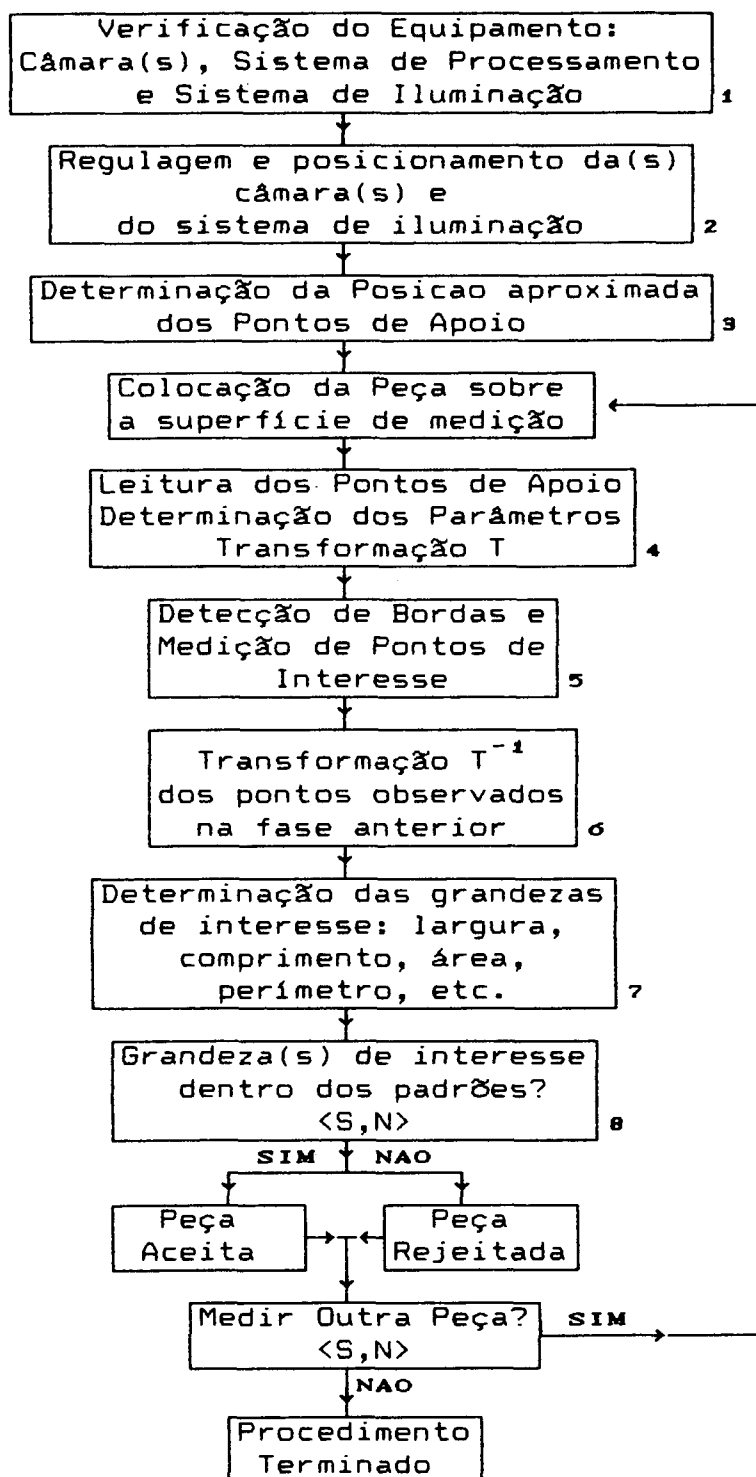


Fig. 5.12 - Fluxograma para o procedimento de controle de qualidade, utilizando uma transformação T .

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Considerações Finais

A utilização de imagens adquiridas por câmaras digitais tem aumentado nos últimos anos, principalmente em sistemas de robótica, visão de máquina e nos sistemas fotogramétricos digitais. Como nestas áreas de aplicação o objetivo principal é a extração de informações de natureza métrica, seja no posicionamento do braço de um robô ou mesmo na medição de uma feição qualquer numa imagem, surge a necessidade de estudar as diversas fontes de erro inerentes ao processo, bem como os modelos matemáticos que permitem a parametrização de alguns destes erros, ou pelo menos daqueles mais significativos.

Algumas destas fontes de erros são familiares aos fotogrametristas, como por exemplo, as distorções das lentes. Outros problemas são específicos deste meio de aquisição, como é o caso do alinhamento e espaçamento entre os elementos sensores e a quantização. Problemas de sincronização do sinal de vídeo e as diferenças entre as frequências da câmara e do conversor analógico/digital (A/D), são decorrentes da

transmissão de sinais e são inerentes ao *hardware*. Além destes, fatores como flutuações de voltagem e dissipação de energia, provocando o aumento da temperatura (*warm up effect*), devem ser observados.

Na sequência são apresentadas algumas considerações, feitas a partir das leituras realizadas.

Quanto às distorções das lentes, o que se observa na literatura e em alguns dos resultados deste trabalho, é que a utilização de apenas um dos coeficientes da distorção radial simétrica já é suficiente para modelar este tipo de erro. Isto pode ser justificado, não tanto pela superioridade das lentes, mas antes pelas dimensões da matriz de sensores.

Efeitos provocados pelo não alinhamento e espaçamento irregular dos sensores é decorrente do processo de construção e uma vez conhecidos, eles não se alteram (a menos que ocorra dilatação).

A questão da quantização está presente em todo processo de discretização de um sinal e a sua minimização depende mais do empenho do fabricante na diminuição do tamanho dos pixels e do aumento da matriz de sensores, do que dos usuários.

As diferenças entre frequências de transmissão da câmara e do conversor A/D podem provocar o aparecimento de faixas verticais na imagem, e a não correspondência entre os

pixel de uma linha da imagem com os elementos sensores da linha correspondente na câmara, fazendo com que as escalas ao longo das direções x e y sejam diferentes. O fator de escala em x pode ser determinado pela transformada de Fourier, como proposto por Lenz & Tsai (1986,1988), pela medição das frequências da câmara e conversor A/D e também num procedimento de calibração. Neste ultimo caso, o modelo proposto por Moniwa(1972) pode ser usado, com algumas considerações.

Outros problemas, como é o caso daqueles causados por influência de flutuações da voltagem, podem ser minimizados com a utilização de filtros; ao passo que, os erros provocados pelo efeito do aumento da temperatura podem ser contornados com a utilização da câmara depois de atingida sua estabilidade térmica.

6.2 Conclusões

A análise das discrepâncias, nas coordenadas planimétricas, obtidas quando da utilização da transformação projetiva no plano e da transformação linear direta, sobre um conjunto de pontos coplanares, mostrou que a discrepância máxima obtida é equivalente para as duas técnicas, ao passo que as discrepâncias médias indicam uma pequena melhoria quando da utilização da DLT. Os testes para a avaliação de tendências mostraram que a DLT absorveu mais erros do que a transformação projetiva.

O procedimento de auto-calibração foi realizado com as mesmas observações utilizadas nos testes com a transformação projetiva no plano e com a DLT, mas com três imagens simultaneamente. Os resultados mostraram que utilizando-se apenas o coeficiente K_1 da distorção radial simétrica, além dos parâmetros f, x_0, y_0, A e B , foram obtidos melhores resultados do que aqueles fornecidos com a inclusão dos coeficientes K_2, K_3, P_1 e P_2 .

Nos resultados dos testes realizados (com a transformação projetiva no plano, DLT e equação de colinearidade com parâmetros adicionais) verifica-se que a qualidade dos resultados é inferior na direção x o que indica que a qualidade das observações é inferior nesta direção, quando comparada com a direção y . Grande parte desta discrepância é causada por problemas de transmissão dos sinais, o que justifica a grande preocupação por parte da comunidade internacional em estudar os problemas de origem eletrônica.

A partir das discrepâncias apresentadas em cada experimento pode-se escrever equações que permitam o cálculo aproximado da distância câmara-alvo, de modo que se obtenha um determinado erro ao final do processo. Para a discrepância resultante média obtida na auto-calibração, admitindo um nível de confiança de 95% e tomando o limite superior do intervalo como referência, pode-se escrever a seguinte equação: $D_{\max}^{(cm)} = \bar{E}_{pos}^{(mm)} \cdot 368$, onde D é a distância máxima recomendada e \bar{E} é

o erro esperado na posição de um ponto.

Em função dos resultados apresentados, percebe-se que é grande a gama de aplicações das câmaras digitais, principalmente em áreas onde o tempo de resposta deve ser baixo. Para ilustrar um tipo de aplicação específica, apresentou-se a concepção para a implantação de um sistema fotogramético para controle de qualidade de peças.

Lembrando os objetivos iniciais do trabalho, pode-se considerar que eles foram cumpridos, apesar das inúmeras possibilidades de investigações que poderiam ser realizadas e que podem ser realizadas.

6.3 Recomendações

A fim de que seja buscado o aprimoramento das técnicas que propiciam o aumento na precisão e acurácia das informações métricas obtidas por meio de câmaras digitais, recomenda-se:

- . a realização de testes com um número maior de pontos de apoio planialtimétricos e com diferentes configurações;

- . a utilização do procedimento de correlação baseado no conceito de geometria epipolar, permitindo a correlação de imagens com grandes inclinações entre si, o que resultaria numa melhoria na qualidade dos parâmetros de calibração;

. que haja uma maior interação entre profissionais das áreas de eletrônica, processamento de imagens e fotogrametria, a fim de que sejam encontradas soluções para os problemas de natureza eletrônica que afetam a qualidade das observações feitas sobre imagens adquiridas por câmaras digitais. Isto possibilitaria a utilização desta ferramenta em mais áreas do conhecimento.

ANEXOS

<u>ANEXO A</u>	-	<u>DIVISÃO DE NÚMEROS COMPLEXOS</u>	130
<u>ANEXO B</u>	-	<u>SUBROTINA PARA A EXECUÇÃO DA FFT-1D</u>	133
<u>ANEXO C</u>	-	<u>TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO</u>	136
<u>ANEXO D</u>	-	<u>TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA - DLT</u>	142

ANEXO A

DIVISÃO DE NÚMEROS COMPLEXOS

Considerando os números complexos X e Y , onde:

$$X = a + bj, \quad (A.1)$$

e

$$Y = c + dj, \quad (A.2)$$

e lembrando que a , b , c e d são números reais, interessa-se pela determinação do resultado da operação X/Y . Esta operação pode ser expressa por $X.Y^{-1}$ o que representa o produto de X pelo inverso de Y , cujo resultado é um número complexo, da forma:

$$X.Y^{-1} = e + fj, \quad (A.3)$$

onde os reais e e f são procurados.

Dado o complexo Y , diferente de zero, o seu inverso pode ser calculado por:

$$Y^{-1} = \frac{\bar{Y}}{|Y|^2} \quad (\text{A.4})$$

onde:

. $\bar{Y} = c - dj$, é conjugado de Y ;

. $|Y| = \sqrt{c^2 + d^2}$, norma de Y .

De fato, para mostrar que (A.4) é realmente o inverso de (A.2) basta que se faça o produto $Y.Y^{-1}$, ou $Y^{-1}.Y$, e se verifique que o resultado seja um(1):

$$\begin{aligned} Y.Y^{-1} &= (c + dj) \cdot \left[\frac{c - dj}{c^2 + d^2} \right] = \\ &= (c + dj) \cdot \left[\frac{c}{c^2 + d^2} - \frac{dj}{c^2 + d^2} \right] = \\ &= \frac{c^2}{c^2 + d^2} - \frac{cdj}{c^2 + d^2} + \frac{dcj}{c^2 + d^2} - \frac{d^2 j^2}{c^2 + d^2} = \\ &= \frac{c^2}{c^2 + d^2} - \frac{d^2 j^2}{c^2 + d^2} = \frac{c^2}{c^2 + d^2} - \frac{d^2(-1)}{c^2 + d^2} = 1. \end{aligned}$$

Deste modo para que se obtenha os reais \underline{e} e \underline{f} , basta que seja feito o produto de (A.1) por (A.4):

$$X.Y^{-1} = (a + bj) \cdot \frac{\bar{Y}}{|Y|^2} = (a + bj) \cdot \left[\frac{c - dj}{c^2 + d^2} \right] =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{ac}{c^2 + d^2} - \frac{adj}{c^2 + d^2} + \frac{bcj}{c^2 + d^2} - \frac{bdj^2}{c^2 + d^2} = \\
&= \left[\frac{ac + bd}{c^2 + d^2} \right] + \left[\frac{bc - ad}{c^2 + d^2} \right] j = e + fj +
\end{aligned}$$

Finalizando, os reais e e f podem ser calculados por:

$$e = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} \quad (\text{A.5})$$

e

$$f = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}, \quad (\text{A.6})$$

não esquecendo da condição de que $c^2 + d^2 \neq 0$.

ANEXO B

SUBROTINA PARA A EXECUÇÃO DA FFT-1D

Na sequência é apresentada uma das subrotinas que pode ser utilizada para a determinação da Transformada Discreta de Fourier unidimensional, utilizando o algoritmo *Fast Fourier Transform*. Esta subrotina foi retirada do livro *NUMERICAL RECIPES, The Art of Scientific Computing*, e é baseada no algoritmo de *Cooley-Tukey*.

Os argumentos de entrada da subrotina são três, o vetor DATA e as variáveis N e ISIGN. Para a utilização desta subrotina algumas observações devem ser feitas:

- . O vetor DATA contém os elementos de entrada, ou seja, o domínio.
- . Este vetor tem dimensão $2*NN$, onde NN é o número de elementos da amostra. NN deve ser potência de 2.
- . O vetor DATA tem dimensão duplicada devido ao fato do domínio ser complexo. Os elementos de ordem ímpar do vetor DATA devem guardar a parte real deste complexo,

enquanto que os elementos de ordem par, a parte imaginária.

- . A variável ISIGN pode assumir os valores +1 ou -1, em função da transformação a ser feita, +1 para a transformação direta e -1 para a inversa.
- . A Transformada Rápida de Fourier retorna no próprio vetor DATA, perdendo portanto os dados de entrada. Para que o vetor original seja utilizado posteriormente uma cópia deste vetor deve ser feita no programa principal.

Na página seguinte é apresentada a subrotina.

```

C  SUBROTINA PARA A EXECUCAO DA TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER
C  SUBROTINA ADAPTADA DE:
C      NUMERICAL RECIPES - The Art of Scientific Computing
      SUBROUTINE      FFT(DATA,N,ISIGN)
      IMPLICIT      REAL      *4(A-H,O-Z)
      REAL*8          WR,WI,WPR,WPI,WTEMP,THETA
      DIMENSION      DATA(N)
      J=1
      DO  11      I=1,N,2
          IF(J. GT. I)THEN
              TEMPR=DATA(J)
              TEMPI=DATA(J+1)
              DATA(J)=DATA(I)
              DATA(J+1)=DATA(I+1)
              DATA(I)=TEMPR
              DATA(I+1)=TEMPI
          ENDIF
          M=N/2
01      IF((M. GE. 2). AND. (J. GT. M))THEN
              J=J-M
              M=M/2
              GOTO  1
          ENDIF
          J=J+M
11      CONTINUE
      MMAX=2
02      IF(N. GT. MMAX)THEN
          ISTEP=2*MMAX
          THETA=6. 28318530717959DO/(ISIGN*MMAX)
          WPR=-2. DO*DSIN(0. 5DO*THETA)**2
          WPI=DSIN(THETA)
          WR=1. DO
          WI=0. DO
          DO  13      M=1,MMAX,2
              DO  12      I=M,N,ISTEP
                  J=I+MMAX
                  TEMPR=SNGL(WR)*DATA(J)-SNGL(WI)*DATA(J+1)
                  TEMPI=SNGL(WR)*DATA(J+1)+SNGL(WI)*DATA(J)
                  DATA(J)=DATA(I)-TEMPR
                  DATA(J+1)=DATA(I+1)-TEMPI
                  DATA(I)=DATA(I)+TEMPR
                  DATA(I+1)=DATA(I+1)+TEMPI
12      CONTINUE
                  WTEMP=WR
                  WR=WR*WPR-WI*WPI+WR
                  WI=WI*WPR+WTEMP*WPI+WI
13      CONTINUE
                  MMAX=ISTEP
                  GOTO  2
              ENDIF
          RETURN
      END

```

ANEXO C

TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA NO PLANO

Considerando um ponto i qualquer, representado em dois espaços distintos (s e S), e cujas coordenadas sejam representadas respectivamente pelos pares ordenados (x_i, y_i) e (X_i, Y_i) , a transformação projetiva envolvendo estes dois espaços pode ser dada por:

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{a1.x_i + b1.y_i + c1}{a3.x_i + b3.y_i + 1} \\ Y_i &= \frac{a2.x_i + b2.y_i + c2}{a3.x_i + b3.y_i + 1} \end{aligned} \tag{C.1}$$

onde:

. $[a1 \ b1 \ c1 \ a2 \ b2 \ c2 \ a3 \ b3]$ representam os parâmetros que relacionam estes dois espaços.

Para facilitar a representação, as equações (C.1) serão reescritas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} X_i &= A_i / C_i \\ Y_i &= B_i / C_i \end{aligned} \tag{C.2}$$

onde :

$$\cdot A_i = a1.x_i + b1.y_i + c1 \quad (C.2a)$$

$$\cdot B_i = a2.x_i + b2.y_i + c2 \quad (C.2b)$$

$$\cdot C_i = a3.x_i + b3.y_i + 1 \quad (C.2c)$$

No procedimento de ajustamento pelo MMQ mostrado na sequência presupõe-se que (x_i, y_i) são livres de erros, o que na realidade é uma simplificação, além disso a matriz peso das observações é considerada identidade. Admitindo o vetor dos parâmetros ajustados como sendo:

$$Xa = [a1 \ b1 \ c1 \ a2 \ b2 \ c2 \ a3 \ b3]^T \quad (C.3)$$

e um total de n pontos observados nos dois espaços pode-se escrever a matriz das derivadas parciais das equações de observação (C.2) em relação aos parâmetros ajustados, da seguinte forma:

$$2n \times 8 \quad A_{\theta} = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{C_1} & \frac{y_1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{-x_1 A_1}{C_1^2} & \frac{-y_1 A_1}{C_1^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x_1}{C_1} & \frac{y_1}{C_1} & \frac{1}{C_1} & \frac{-x_1 B_1}{C_1^2} & \frac{-y_1 B_1}{C_1^2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_n}{C_n} & \frac{y_n}{C_n} & \frac{1}{C_n} & 0 & 0 & 0 & \frac{-x_n A_n}{C_n^2} & \frac{-y_n A_n}{C_n^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{x_n}{C_n} & \frac{y_n}{C_n} & \frac{1}{C_n} & \frac{-x_n B_n}{C_n^2} & \frac{-y_n B_n}{C_n^2} \end{bmatrix} \quad (C.4)$$

É interessante observar que o número de parâmetros sendo oito, então o número mínimo de pontos necessários ao

ajustamento pelo MMQ deve satisfazer a condição $n > 4$.

A matriz normal N, determinada por $A^T P A$, onde P é a matriz peso das observações $(X_1 \ Y_1 \ \dots \ X_n \ Y_n)$ e admitida aqui como sendo igual a identidade, pode ser representada por:

$$N = \begin{bmatrix} \frac{\sum x^2}{C^2} & \frac{\sum xy}{C^2} & \frac{\sum x}{C^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\sum -x^2 A}{C^3} & \frac{\sum -xy A}{C^3} \\ & \frac{\sum y^2}{C^2} & \frac{\sum y}{C^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\sum -xy A}{C^3} & \frac{\sum -y^2 A}{C^3} \\ & & \frac{\sum 1}{C^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\sum -x A}{C^3} & \frac{\sum -y A}{C^3} \\ & & & \frac{\sum x^2}{C^2} & \frac{\sum xy}{C^2} & \frac{\sum x}{C^2} & \frac{\sum -x^2 B}{C^3} & \frac{\sum -xy B}{C^3} \\ & & & & \frac{\sum y^2}{C^2} & \frac{\sum y}{C^2} & \frac{\sum -xy B}{C^3} & \frac{\sum -y^2 B}{C^3} \\ & & & & & \frac{\sum 1}{C^2} & \frac{\sum -x B}{C^3} & \frac{\sum -y B}{C^3} \\ & & & & & & \frac{\sum x^2 (A^2 + B^2)}{C^4} & \frac{\sum xy (A^2 + B^2)}{C^4} \\ & & & & & & & \frac{\sum y^2 (A^2 + B^2)}{C^4} \end{bmatrix}$$

Simétrica

(C.5)

Notar que a Matriz normal N é simétrica e de dimensões 8x8, além disso os símbolos e variáveis \sum , A, B, C, x e y devem ser considerados como sendo respectivamente $\sum_{i=1}^n$, A_i , B_i , C_i , x_i e y_i . O índice i das variáveis foram suprimidos apenas para simplificação das expressões.

Chamando o vetor dos parâmetros aproximados de $X_0 = [a1_0 \ b1_0 \ c1_0 \ a2_0 \ b2_0 \ c2_0 \ a3_0 \ b3_0]^T$, e o vetor das observações de:

$$Lb = [X_1 \ Y_1 \ X_2 \ Y_2 \ \dots \ X_n \ Y_n]^T \quad (C.6)$$

e ainda representando o vetor $L = F(X_0) - Lb$ por:

$$L = [X_{1L} \ Y_{1L} \ X_{2L} \ Y_{2L} \ \dots \ X_{nL} \ Y_{nL}]^T \quad (C.7)$$

o vetor resultante do produto $A^T PL$ assume:

$$U_1 = \begin{bmatrix} \Sigma \frac{x X_L}{C} \\ \Sigma \frac{y X_L}{C} \\ \Sigma \frac{X_L}{C} \\ \Sigma \frac{x Y_L}{C} \\ \Sigma \frac{y Y_L}{C} \\ \Sigma \frac{Y_L}{C} \\ \Sigma \frac{-x A X_L}{C^2} + \frac{-x B Y_L}{C^2} \\ \Sigma \frac{-y A X_L}{C^2} + \frac{-y B Y_L}{C^2} \end{bmatrix} \quad (C.8)$$

As mesmas observações relativas aos símbolos são feitas aqui, acrescentando-se que as variáveis X_L e Y_L sejam consideradas como sendo X_{iL} e Y_{iL} , respectivamente.

Finalmente o vetor $[X]$ das correções aos parâmetros

aproximados, X_0 , pode ser calculado por:

$$X = - N^{-1}U \quad (C.9)$$

Como o modelo matemático (C.1) é não linear em relação aos parâmetros é necessário que se faça iterações, assim sendo o vetor dos parâmetros ajustados para uma determinada iteração i pode ser representado da seguinte maneira:

$$X_{a_i} = X_{a_{i-1}} - N_{i-1}^{-1} \cdot U_{i-1} \quad (C.10)$$

com i variando de 1 até o índice tal que o termo $N_{i-1}^{-1} \cdot U_{i-1}$ se torne desprezível. Convém observar que para $i=1$ o termo $X_{a_{i-1}}$ é o próprio vetor dos parâmetros aproximados.

Uma vez determinado o vetor X_a , pode-se transformar as coordenadas de um ponto i qualquer, do sistema (X,Y) para (x,y) . Esta transformação é a inversa da (C.1) e pode ser feita por:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a3X_i - a1 & b3X_i - b1 \\ a3Y_i - a2 & b3Y_i - b2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} c1 - X_i \\ c2 - Y_i \end{bmatrix} \quad (C.11)$$

Invertendo a matriz 2x2 acima, a expressão (C.11) se reduz a:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{DET_i} \begin{bmatrix} b3Y_i - b2 & b1 - b3X_i \\ a2 - a3Y_i & a3X_i - a1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c1 - X_i \\ c2 - Y_i \end{bmatrix} \quad (C.12)$$

com:

$$\cdot \text{DET}_i = (a_3X_i - a_1)(b_3Y_i - b_2) - (a_3Y_i - a_2)(b_3X_i - b_1),$$

sendo DET_i o determinante da matriz 2×2 em (C.11). O índice i é utilizado neste caso pois o determinante é função, além de outros elementos, das coordenadas (X_i, Y_i) .

ANEXO D

TRANSFORMAÇÃO LINEAR DIRETA - DLT

Foi mostrado o modelo matemático da Transformação Linear Direta no Capítulo 4. Neste anexo serão explorados alguns aspectos do ajustamento pelo MMQ, bem como a determinação das coordenadas no espaço objeto.

Utilizando o modelo matemático apresentado no item 4.4.3, desprezando-se os parâmetros K_2 , K_3 , P_1 e P_2 e fazendo $K_1 \cdot A = K_1$, com $A = L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1$, pode-se escrever o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1x_1 & -x_1y_1 & -x_1z_1 & -x_1r_1^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & -y_1x_1 & -y_1y_1 & -y_1z_1 & -y_1r_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_nx_n & -x_ny_n & -x_nz_n & -x_nr_n^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & -y_nx_n & -y_ny_n & -y_nz_n & -y_nr_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \\ K_1' \end{bmatrix} \quad (D.1)$$

Se o número de pontos observados (n) for maior que seis, é possível o ajustamento pelo MMQ. Como o número de parâmetros é 12 a dimensão da matriz $N(A^T PA)$ será 12x12 e do

vetor U ($A^T PL$) será 12×1 . O vetor L é o vetor resultante da operação $L_0 - L_b$, sendo $L_0 = F(X_0)$. Como o modelo é linear em relação aos parâmetros $[L_1 \dots L_{11} K_1]$, pode-se adotar zero para o vetor X_0 e deste modo L passa a ser o próprio vetor das observações (com sinal trocado). A solução final será dada por:

$$x_a = -N^{-1}U = (A^T A)^{-1} \cdot A^T L_b \quad (D.2)$$

onde:

$$\begin{aligned} \cdot x_a &= [L_1 \ L_2 \ L_3 \ \dots \ L_{11} \ K_1]^T \\ \cdot L_b &= [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ \dots \ x_n \ y_n]^T \end{aligned}$$

A matriz N , como já foi dito tem dimensão 12×12 e para facilitar a sua escrita N será dividida em sub-blocos de dimensões 4×4 :

$${}_{12}^{12} N = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \text{B}_1 & \text{B}_2 & \text{B}_3 \\ \text{B}_1 & \text{B}_4 & \end{matrix} \\ \text{Simétrica} & \text{B}_5 \end{bmatrix} \quad (D.3)$$

onde:

$$\begin{matrix} \text{B}_1 \\ \text{B}_1 \end{matrix} = \begin{bmatrix} \sum x^2 & \sum xy & \sum xz & \sum x \\ & \sum y^2 & \sum yz & \sum y \\ & & \sum z^2 & \sum z \\ \text{Simétrica} & & & n \end{bmatrix} \quad (D.4)$$

$${}^4B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (D.5)$$

$${}^4B_3 = \begin{bmatrix} -\sum xX^2 & -\sum xXY & -\sum xXZ & -\sum xXr^2 \\ -\sum xXY & -\sum xY^2 & -\sum xYZ & -\sum xYr^2 \\ -\sum xXZ & -\sum xYZ & -\sum xZ^2 & -\sum xZr^2 \\ -\sum xX & -\sum xY & -\sum xZ & -\sum xr^2 \end{bmatrix} \quad (D.6)$$

$${}^4B_4 = \begin{bmatrix} -\sum yX^2 & -\sum yXY & -\sum yXZ & -\sum yXr^2 \\ -\sum yXY & -\sum yY^2 & -\sum yYZ & -\sum yYr^2 \\ -\sum yXZ & -\sum yYZ & -\sum yZ^2 & -\sum yZr^2 \\ -\sum yX & -\sum yY & -\sum yZ & -\sum yr^2 \end{bmatrix} \quad (D.7)$$

$${}^4B_5 = \begin{bmatrix} \sum(x^2X^2+y^2X^2) & \sum(x^2XY+y^2XY) & \sum(x^2XZ+y^2XZ) & \sum(x^2Xr^2+y^2Xr^2) \\ & \sum(x^2Y^2+y^2Y^2) & \sum(x^2YZ+y^2YZ) & \sum(x^2Yr^2+y^2Yr^2) \\ & & \sum(x^2Z^2+y^2Z^2) & \sum(x^2Zr^2+y^2Zr^2) \\ \text{Simétrica} & & & \sum(x^2r^4+y^2r^4) \end{bmatrix} \quad (D.8)$$

O vetor U pode ser calculado por:

$${}_{12}U_1 = \begin{bmatrix} \Sigma xX \\ \Sigma xY \\ \Sigma xZ \\ \Sigma x \\ \Sigma yX \\ \Sigma yY \\ \Sigma yZ \\ \Sigma y \\ -\Sigma (x^2X + y^2X) \\ -\Sigma (x^2Y + y^2Y) \\ -\Sigma (x^2Z + y^2Z) \\ -\Sigma (x^2r^2 + y^2r^2) \end{bmatrix} \quad (D.9)$$

Uma vez determinada a solução por (D.2), utilizando-se dos resultados fornecidos por (D.3) e (D.9), pode-se determinar as coordenadas (X,Y,Z) de um ponto, a partir da solução de um sistemas de equações onde X, Y e Z são incógnitas, onde os parâmetros da DLT são conhecidos para cada uma das imagens em que o ponto de interesse pertença e onde as coordenadas de imagem destes mesmos pontos são observadas. Uma maneira de resolver este problema utilizando uma única imagem seria resolver um sistema de duas equações a duas incógnitas, sendo que neste caso, é necessário que se conheça pelo menos uma das coordenadas do ponto que se deseja determinar.

Escrevendo-se apenas duas equações do sistema mostrado em (D.1), para um ponto i genérico, tem-se:

$$\begin{aligned} L_1 X_i + L_2 Y_i + L_3 Z_i + L_4 &= x_i X_i L_9 + x_i Y_i L_{10} + x_i Z_i L_{11} + x_i + x_i r_i^2 K_1 \\ L_5 X_i + L_6 Y_i + L_7 Z_i + L_8 &= y_i X_i L_9 + y_i Y_i L_{10} + y_i Z_i L_{11} + y_i + y_i r_i^2 K_1 \end{aligned} \quad (D.10)$$

Admitindo que Z_i e os parâmetros $[L_1 \dots L_{11} K_1']$ são conhecidos, pode-se escrever a partir da (D.10) o seguinte sistema de equações em X e Y :

$$\begin{bmatrix} L_1 - x_i L_9 & L_2 - x_i L_{10} \\ L_5 - y_i L_9 & L_6 - y_i L_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (D.11)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_i (x_i L_{11} - L_3) + x_i (1 + K_1' r^2) - L_4 \\ Z_i (y_i L_{11} - L_7) + y_i (1 + K_1' r^2) - L_8 \end{bmatrix} \quad (D.11a)$$

A resolução da (D.11) resulta em:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{\text{DET}_i} \begin{bmatrix} L_6 - y_i L_{10} & x_i L_{10} - L_2 \\ y_i L_9 - L_5 & L_1 - x_i L_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (D.12)$$

onde:

$$\text{DET}_i = (L_1 - x_i L_9)(L_6 - y_i L_{10}) - (L_2 - x_i L_{10})(L_5 - y_i L_9)$$

Como pode-se observar, o segundo membro da (D.12) é composto apenas por elementos conhecidos: $L_1, \dots, L_{11}, K_1', x_i, y_i$ e Z_i .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ ANDRADE, J. B. de & OLIVAS, M. A. de A. Calibração de Câmeras Aerofotogramétricas. Curitiba. Boletim n^o 26, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. 30p, 1981.
- /02/ ATKINSON, K. B. Developments in Close Range Photogrammetry - 1. Applied Science Publishers LTD, London, 1980.
- /03/ BAHR, H. P. Fundamentos para el Tratamiento Digital de Imagenes. 1988.
- /04/ BEYER, H. A. Some Aspects of the Geometric Calibration of CCD-Cameras. ISPRS Intercommission Conference on "Fast Processing of Photogrammetric Data", Interlaken, June 2-4, 1987.
- /05/ BEYER, H. A. Linejitter and Geometric Calibration of CCD-Cameras. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 45, 17-32, 1990.
- /06/ BRIGHAM, E. O. The Fast Fourier Transform. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- /07/ BROWN, D. C. Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, pag. 855-866. 1971.

- /08/ DAHLER, J. Problems in Digital Image Acquisition with CCD Cameras. ISPRS Intercommission Conference on "Fast Processing of Photogrammetric Data", Interlaken, pag. 1 - 11, June 2-4, 1987.
- /09/ EL-HAKIM, S. F. Real Time Image Metrology with CCD Cameras. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, pag. 1757-1766, November 1986.
- /10/ FAUST, H. W. Digitization of Photogrammetric Images. 42nd Photogrammetric Week Stuttgart, September 14-19, 1987.
- /11/ FRYER, J. G. & MASON, S. O. Rapid Lens Calibration of a Video Camera. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, no. 4, pag. 437-442, April 1989.
- /12/ GONZALES, R. C. & WINTZ, P. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1977.
- /13/ GRUEN, A.W. & BEYER, H. A. Real-Time Photogrammetry at the Digital Photogrammetric Station (DIPS) of the ETH Zurich. The Canadian Surveyor, Vol. 41, No 2, Pag. 181-199, 1987.
- /14/ GRUEN, A. Towards Real-Time Photogrammetry. Invited paper to the 41nd Photogrammetric Week Stuttgart, September 14-19, 1987.
- /15/ HASEGAWA, J. K. & FARIA, S, D. Resolução de Sistemas por Microcomputadores. XIV Congresso Brasileiro de Cartografia, Gramado RS, maio 21-26, 1989.
- /16/ IMAGING Technology Inc. ITEX PCplus PROGRAMMER'S MANUAL, Part number 47-S00008-01, april, 1987.

- /17/ KANGAR-PARSI, B. & KANGAR-PARSI, B. Evaluation of Quantization Error in Computer Vision. IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, Vol. 11, no. 9, Sep., 1989.
- /18/ LENZ, R. K. & TSAI, R. Y. Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology. IBM T. J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10598, September 30, 1986.
- /19/ LENZ, R. K. Lens distortion corrected CCD - camera calibration with co-planar calibration points for real-time 3D measurements. ISPRS Intercommission Conference on "Fast Processing of Photogrammetric Data", Interlaken, Switzerland, June 2-4, 1987.
- /20/ LENZ, R. K.; TSAI, R. Y. Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10, no. 5, September 1988.
- /21/ LENZ, R. K.; TSAI, R. Y. Calibrating a Cartesian Robot with Eye-on-Hand Configuration Independent of Eye-to-Hand Relationship. IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, Vol. 11, no. 9, Sep., 1989.
- /22/ LIANG, P.; CHANG, Y. L. & HACKWOOD, S. Adaptive Self-Calibration of Vision-Based Robot Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 19, no. 4, July/August 1989.

- /23/ LUGNANI, J. B. Introdução à Fototriangulação. Curitiba, 1987, 134p.
- /24/ MERCHANT, D. C. ANALYTICAL PHOTOGRAMMETRY, Theory and Practice. Part I., The Ohio State University, Dept. of Geodetic Science, 1979.
- /25/ MERCHANT, D. C. ANALYTICAL PHOTOGRAMMETRY, Theory and Practice. Part II., The Ohio State University, Dept. of Geodetic Science, 1980.
- /26/ MIKHAIL, E. M. Observations and Least Squares. University Press of America, New York, 1976, 497p.
- /27/ MONIWA, H. Analytical Camera Calibration for Close-Range Photogrammetry. New Brunswick. Thesis, Master of Science, University of New Brunswick, 1972, 104p.
- /28/ MONIWA, H. Analytical Photogrammetric System with Self-Calibration and its Applications. New Brunswick. Thesis, Doctor of Philosophy, University of New Brunswick, 1977, 106p.
- /29/ PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A. & VETTERLING, W. T. Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- /30/ STRAUCH, J. C. M. Correlação de Imagens Digitais. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba PR, 1991, 77 p.

- /31/ TOMMASELLI, A. M. G. & TOZZI, C. L. Técnicas de Calibração de Câmaras em Visão Computacional. Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, Dezembro, 1990.
- /32/ TOMMASELLI, A. M. G. & TOZZI, C. L. Calibração de Câmaras. XV Congresso Brasileiro de Cartografia, São Paulo SP, 28 julho - 02 agosto, 1991.